

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301- Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Návrh konstrukce vstříkovací formy pro zadaný díl

Design concept of injection mould tool for chosen part

Miroslav Hornych

KSP – TP – 788

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Tomáš Poupa - TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 69

Počet tabulek 12

Počet příloh 3

Počet obrázků 54

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Miroslav Hornych
Téma práce: Návrh konstrukce vstřikovací formy pro zadaný díl
Design concept of injection mould tool for chosen part

Číslo DP: KSP – TP – 788
Vedoucí DP: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - **TU v Liberci**
Konzultant: Ing. Tomáš Poupa - **TU v Liberci**

Abstrakt: Diplomová práce navrhuje konstrukci vstřikovací formy pro plastový výrobek. V teoretické části je stručně pojednáno o vstřikovacím stroji, vstřikovacím cyklu a o složení vstřikovací formy včetně jejích hlavních funkcí. Tato část obsahuje také přehled možností použití simulačního softwaru mpi. Praktická část práce popisuje závod Siemens VDO Automotive, díl vybraný pro konstrukci formy a především postup a popis její konstrukce. Pro ověření návrhu byla provedena simulace pomocí mpi. V závěrečné části je na základě výsledků z výrobního procesu hodnoceno ekonomické, časové hledisko výroby této formy a její funkčnost.

Abstract: The thesis designs mould tool for chosen part. In theoretical part is shortly dissertating about injection machine, injection cycle and about composition of injection tool including its main functions. This part includes review of possibility of simulation software mpi. The practical part describing concern Siemens VDO Automotive, chosen part for design of mould tool and mainly describes its design. For checking of design it was perform simulation with mpi. In closing part there are an economical, making-time and functional rankings of this mould tool based on the results from the production process.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....
Miroslav Hornych
K Sídlišti 288/46
54954 Police nad Metují

Poděkování:

Děkuji především svým rodičům a rodině za veškerou podporu během mého studia.

Děkuji kolegům z konstrukce a kolektivu lidí, kteří mi byly oporou při samotné konstrukci a při následném sběru dat ohledně formy.

V neposlední řadě děkuji doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za jeho rady a připomínky při zpracování diplomové práce a také za vstřícné a lidské jednání.

Obsah:

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI	1
Fakulta strojní	1
Návrh konstrukce vstřikovací formy pro zadaný díl.....	1
Design concept of injection mould tool for chosen part	1
KSP – TP – 788.....	1
Rozsah práce a příloh:	1
ANOTACE.....	3
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI	3
Fakulta strojní	3
Katedra strojírenské technologie.....	3
Oddělení tváření kovů a plastů.....	3
Místopřísežné prohlášení:	4
Poděkování:.....	5
Obsah:	1
Zkratky:	5
Symboly :	5
1. Úvod.....	7
2. Teoretická část	8
2.1 Technologie vstřikování termoplastů /1/, /2/, /3/	8
2.1.1 Vstřikovací stroj /1/, /2/, /3/, /4/	8
2.1.2 Vstřikovací cyklus /1/, /2/, /3/, /4/.....	9
2.2 Formy pro vstřikování termoplastů /3/, /4/, /5/, /6/, /7/.....	10
2.2.1 Složení forem /3/, /4/, /5/, /6/, /7/	11
2.2.1.1 Tvarové části /3/, /4/, /5/	11
2.2.1.2 Rám formy /3/, /4/, /5/, /6/, /7/	11
2.2.1.3 Vyhazovací systém /3/, /4/, /5/, /6/, /7/	12
2.2.1.4 Středící a vodící prvky /3/, /4/, /5/.....	12
2.2.2 Vtokové soustavy vstřikovacích forem /3/, /4/, /5/	13
2.2.2.1 Vtokové kanály /3/, /4/, /5/.....	13
2.2.2.2 Vtokové ústí /3/, /4/, /5/	14
2.2.2.2.1 Kuželový vtok	14

2.2.2.2.2 Bodový vtok	15
2.2.2.2.3 Tunelový vtok	15
2.2.2.2.4 Filmový vtok	15
2.2.2.2.5 Banánový vtok	16
2.2.3 Odvzdušnění formy /5/, /6/, /7/	16
2.2.4 Temperace forem /5/, /6/	17
2.2.4.1 Význam chlazení / temperování forem /3/, /4/	17
2.2.3.2 Teplotní profil na povrchu dutiny formy /3/, /4/	23
2.2.3.4 Výpočet doby chlazení	26
2.2.3.5 Způsob temperace /3/, /4/	26
2.3 Simulační software Moldflow Plastics Insight /9/	26
2.3.1 Výhody použití analýzy /9/	26
2.3.2 Volba geometrie /9/	27
2.3.2.1 Tradiční Midplane výpočtový model /9/	27
2.3.2.2 Fusion výpočtový model /9/	27
2.3.2.3 3D Výpočtový model /9/	28
2.3.3 Možnosti simulace /9/	28
2.3.3.1 Plastic Flow /9/	28
2.3.3.2 Mpi/Gas /9/	28
2.3.3.3 Mpi/Co-Injection /9/	29
2.3.3.4 Mpi/Injection Compression /9/	29
2.3.3.5 Mpi/MuCell /9/	29
2.3.3.6 Optimalizační simulace vstřikovacího procesu /9/	29
2.3.3.6.1 Mpi/Design-of-Experiments /9/	29
2.3.3.6.2 Mpi/Optim /9/	30
2.3.3.7 Mpi/Cool /9/	30
2.3.3.8 Simulace strukturní integrity /9/	30
2.3.3.8.1 Mpi/Warp /9/	30
2.3.3.8.2 Mpi/Fiber /9/	30
2.3.3.8.3 Mpi/Shrink /9/	31
2.3.3.8.4 Mpi/Stress /9/	31
2.3.3.9 Simulace vstřikování reaktoplastu /9/	31
2.3.3.9.1 MpiReactive Molding /9/	31
2.3.3.9.2 Mpi/Microchip Encapsulation /9/	31

3. Experimentální / praktická část.....	32
3.1 O společnosti Siemens AG /8/	32
3.1.1 Siemens VDO Automotive /8/	32
3.1.1.1 Produkty /8/	33
3.2 Vybraný díl /8/	33
3.3 Materiál Hostaform C 13031 /9/, /10/, /11/.....	34
3.3.1 Specifikace materiálu /9/, /10/, /11/	34
3.3.2 Doporučené hodnoty zpracování:	35
3.3.3 Mechanické vlastnosti.....	35
3.3.4 Reologické vlastnosti:	36
3.3.5 pvT vlastnosti /9/, /10/, /11/	36
3.4 Konstrukce formy /4/, /6/, 12/	37
3.4.1 Software pro konstrukci formy /12/	37
3.4.2 Příprava modelu dílu /12/	38
3.4.3 Rozbor dílu a volba typu formy /6/, 12/	38
3.4.4 Volba umístění vtoku	40
3.4.5 Vtoková soustava /6/	40
3.4.6 Konstrukce tvarových částí /6/	42
3.4.6.1 Čelisti (poz. 6,7 příloha 1) /6/	42
3.4.6.2 Jádra spodní a boční (poz. 36, 37 příloha 1) /6/	43
3.4.6.3 Opěrka (poz. 35 příloha 1.) /6/	43
3.4.7 Rám formy /6/	43
3.4.8 Mechanika a funkce formy /6/	44
3.4.9 Odvzdušnění formy	44
3.4.10 Chlazení formy /4/	44
3.5 Materiály použité ve formě a tepelné zpracování. /13/	46
3.5.1 Nástrojová ocel W.Nr. 1.2767 /13/	46
3.5.2 Nástrojová ocel W.Nr. 1.1730 /13/	47
3.6 Technická dokumentace a podklady pro technologii výroby /12/	49
3.7 Výroba formy	49
3.8 Vzorkování a doladění formy.....	50
3.9 Volba lisu, nastavení lisovacího procesu /1/	50
3.10 Výpočty /4/, /14/	51
3.10.1 Vstřikovací kapacita a plastifikační kapacita	51

3.10.2 Temperanční systém /4/, /14/	51
3.11 Simulace vstřikování /9/, /12/	54
3.11.1 Simulace pomocí MoldflowXpress /12/.....	54
3.11.2 Simulace pomocí Moldflow Plastics Insight –mpi /9/	55
3.11.2.1 Příprava simulace /9/	55
3.11.2.2 Doporučení umístění vtoku a závislosti parametrů /9/.....	55
3.11.2.3 Vlastní simulace /9/	58
4. Časové a ekonomické zhodnocení	67
4.1 Časové zhodnocení.....	67
4.2 Ekonomické zhodnocení	68
5. Závěr	69
6. Literatura	70
7.Přílohy	70
Prohlášení.....	1
Declaration	2

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky:

ABS	Akrylonitril-butadien-stryren kopolymer
KT	kalendářní týden
mpi	Moldflow Plastics Insight
PA	Polamid
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
POM	Polyoximethylén
PP	Polypropylén
Pro E	ProEngineer
SAN	Styren-akrylonitril kopolymer

Symboly :

a	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	součinitel teplotní vodivosti kapaliny
b	$[\text{Ws}^{1/2}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}]$	tepelná permeabilita
b_M	$[\text{Ws}^{1/2}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}]$	tepelná permeabilita materiálu plastu
b_w	$[\text{Ws}^{1/2}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}]$	tepelná permeabilita materiálu formy
c_k	$[\text{m s}^{-1}]$	rychlost proudění temperační kapaliny
c	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
d_{hi}	$[\text{m}]$	hydraulický průměr kanálu
E	$[\text{MPa}]$	modul pružnosti
Δh_p	$[\text{J/g}]$	rozdíl entalpií materiálu vylisku
h_{tk}	$[\text{m}]$	střední vzdálenost mezi povrchem dutiny a osou temperačního kanálu
k	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
l	$[\text{m}]$	délka temperačních kanálů v okolí tvarové dutiny
n	$[-]$	násobnost
m	$[\text{g}]$	hmotnost vylisku včetně vtoku
m_v	$[\text{g}]$	hmotnost vylisku
m_x	$[\text{g}]$	hmotnost vtokového zbytku
p	$[\text{Pa}]$	tlak

Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Q _p	[kg hod ⁻¹]	plastifikační kapacita
Q _v	[cm ³]	vstřikovací kapacita lisu
r	[m]	průměr kanálu
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	celková plocha chladících okruhů
T	[°C]	teplota
t _c	[s]	doba vstřikovacího cyklu
T _F	[°C]	teplota povrchu tvarové dutiny
T _m	[°C]	teplota chladicího média
T _t	[°C]	teplota taveniny
T _u	[°C]	teplota okolí
T _v	[°C]	teplota vyhození
s	[m]	tloušťka stěny
v	[m ³]	objem
x	[kg m ⁻³]	hustota taveniny
α	[-]	koeficient teplotního smrštění
α_k	[W m ⁻² K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperančního kanálu a temperanční kapalinou
Φ_t	[W]	tepelný tok mezi temperovací kapalinou a formou
Φ_p	[W]	tepelný tok mezi výstřikem a formou
λ	[W m ⁻² K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
λ_F	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti materiálu formy
λ_{tm}	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti temperovacího média
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ν_A	[°C]	teplota ochlazení
ν_E	[°C]	teplota tuhnutí
\bar{g}_w	[°C]	teplota dutiny formy
Δg_w	[°C]	rozdíl teplot na povrchu dutiny formy během cyklu
ρ	[kg m ⁻³]	hustota pevné fáze
σ	[Pa]	napětí

1.Úvod

Formy na vstřikování plastu jsou jedny z nejdražších položek v průmyslové výrobě plastových výrobků. Je to způsobeno vysokými nároky a vysokou přesností forem. Pro úspornost vstřikovací formy je rozhodující, jak rychle a jak dobře probíhá tepelná výměna mezi nástrojem a vstřikovaným plastem. Kvalita vstřikovaného dílu závisí na rozložení teplotního pole a průběhu teplotního pole během cyklu. Pro cenovou efektivitu výroby je důležité, aby forma dobře odváděla teplo. Je zde také kladen požadavek na vysokou rychlost konstrukce a výroby vstřikovací formy a co nejrychlejší uvolnění takto vyrobené formy do sériové výroby. Pro rychlost a ekonomičnost výroby formy je nutné pečlivě navrhnout co nejjednodušší a funkční konstrukci a při výrobě formy používat co nejvíce normalizovaných částí. Konstruktor formy i daného dílu se musí řídit vymezenými specifickými možnostmi, které technologie vstřikování plastů dovoluje.

Konstrukcí nástroje pro vstřikování plastů daného dílu se zabývá i tato diplomová práce zadaná společností Siemens VDO Automotive. Zadáním práce je navrhnout a zhotovit konstrukci s kompletní výkresovou dokumentací včetně podkladu pro technologii výroby (3d modely, výkresy elektrod, nájezdy elektrod), sledovat a popsat průběh výroby nástroje i uvedení nástroje do sériové výroby. Dále je cílem celý proces vstřikování pro danou formu simulovat pomocí softwaru Moldflow a následně vyhodnotit správnost konstrukce a technologických podmínek vstřikování. Diplomová práce je členěna do tří částí. V první je pojednáno o teorii vstřikování plastů a popsány vstřikovací cyklus, stroj, forma. Je zde podrobněji rozepsáno o vtokové soustavě a o teorii temperace forem. V této části je také zmíněn software Mold Flow a o jeho možnosti.

Druhá část praktická-experimentální popisuje společnost Siemens, vybraný díl, materiál dílu, postup a rozbor konstrukce pro daný díl, materiál jednotlivých částí formy, sledování formy při výrobě a její zkoušení. Tato část obsahuje také výpočty pro požadavky na lis a je zde také zjednodušený výpočet tepelné bilance formy. Druhou část doplňuje simulace celého procesu.

Třetí část vyhodnocuje konstrukci a procesu dle simulace a zhodnocuje také časový průběh výroby.

2. Teoretická část

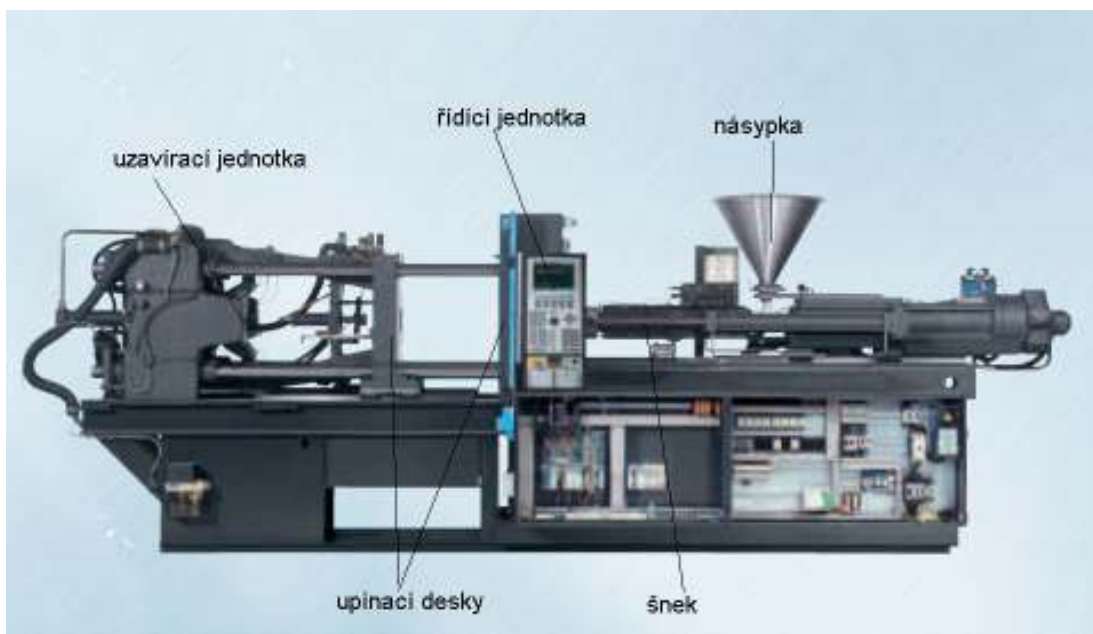
2.1 Technologie vstřikování termoplastů /1/, /2/, /3/

Vstřikování termoplastů je nejvíce rozšířenou výrobní technologií, produkty takto vyráběné mají široké uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. Velikost vylisku se pohybuje od miniaturních hodinářských dílů až po 100 kg vážící vylisky.

Principem této technologie je plastifikace termoplastu a jeho následné vstříknutí pod tlakem do dutiny formy. Roztavený termoplast tuhne a ztuhlý vylisek má tvar dutiny formy. Vstřikované díly dosahují velké přesnosti a není nutné dále je obrábět.

2.1.1 Vstřikovací stroj /1/, /2/, /3/, /4/

Vstřikovací stroj je komplexní jednotka, na kterou se upne forma a stroj se stará o uzavření formy, plastifikaci termoplastu, řízení procesu vstřiku, dotlaku, řízení mechaniky formy, případně řídí teplotu.



Obr. 1.1: Schéma odkrytovaného vstřikovacího stroje. /2/

Vstřikovací jednotka se stará o dávkování materiálu většinou ve formě granulátu. Vstřikovací jednotky se dělí na pístové (málo používané) a na šnekové (více

používané - lepší prohnětení materiálu). Z násypky se plast dostává do plastifikační jednotky, kde se postupně v jednotlivých vyhřívaných zónách plastifikuje. Materiál se ohřívá topením a hnětením v šneku.

Uzavírací jednotka je většinou kolenopákový mechanismus ovládaný hydraulicky (pro střední a velké díly), slouží k uzavření formy ve fázi plnění taveninou. Pro malé uzavírací síly je často používána elektrická uzavírací jednotka se sice menší možností uzavírací síly, ale s mnohem rychlejšími posuvy a odezvami. Uzavírací jednotka také zajišťuje rozjíždění formy a pohon vyhazování.

Celý proces je regulován řídicí jednotkou, jenž po nastavení řídí automatický chod stroje, hlásí chyby a umožňuje přepnutí do poloautomatického či ručního režimu.

Základní parametry vstřikovacího stroje jsou: uzavírací síla, vstřikovací kapacita, plastifikační kapacita, vzdálenost mezi sloupky, průměr šneku, poměr šneku.

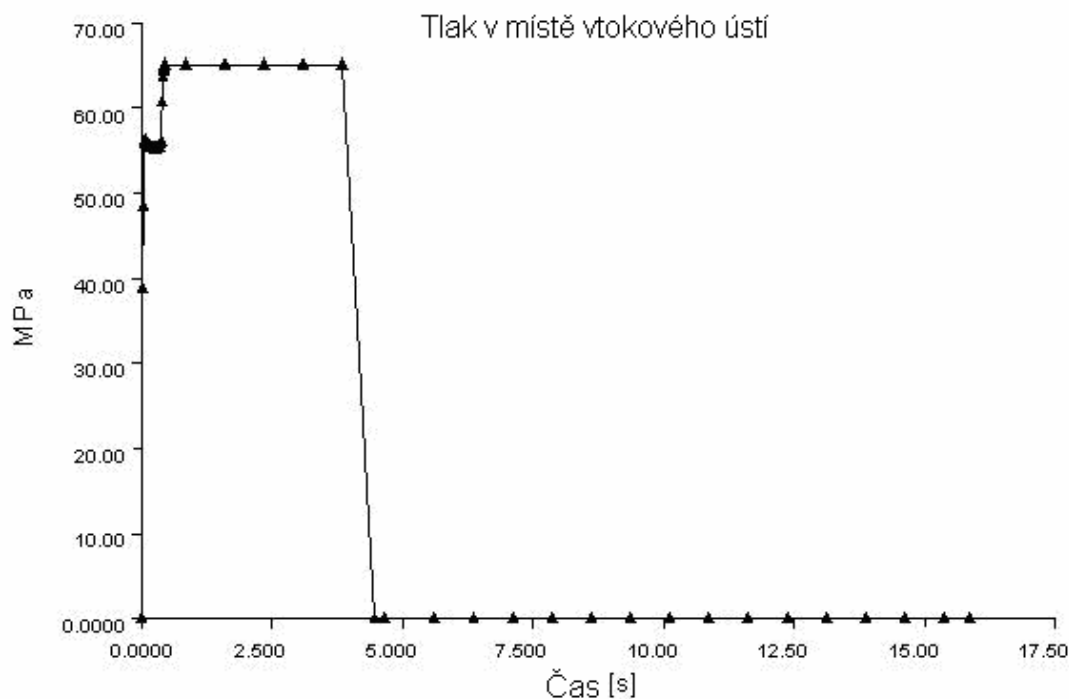
2.1.2 Vstřikovací cyklus /1/, /2/, /3/, /4/

Vstřikovací cyklus je posloupnost po sobě jdoucích operací při vstřikování plastu. Počátek cyklu je zavření formy a pohybem šneku či pístu vstříknutí plastu do dutiny formy. Po vstříknutí plastu nastává fáze dotlaku, kdy dotlačujeme materiál do formy, kde se materiál smršťuje vlivem chladnutí. Pro dodávání materiálu ve fázi dotlaku je nutný tavný polštář, který má mít velikost 20% objemu celého vstřiku. V okamžiku, kdy materiál ve formě zamrzne a dotlak nemá smysl, nastává fáze chlazení a zároveň plastifikace nové dávky. Chlazení trvá do doby, než se materiál ve formě dostane na teplotu určenou pro vyhození a následně se forma otvírá a výlisek je vyhozen.

Obr. 2.2: Schéma pohybu šneku /2/

Pohyb šneku v cyklu se dělí na několik fází, při vstřikování šnek koná lineární pohyb směrem k formě, ve fázi dotlaku šnek působí tlakem na tavný polštář. Při plastifikaci šnek rotuje a nabírá z násypky materiál, který přes závěrku vtlačuje před čelo šneku a tím se pohybuje směrem dozadu. Na konci plastifikace šnek provede dekompresi.

Cyklus lze hodnotit v závislosti tlaku na čase nebo pak p-v-T diagramem.



Obr. 2.3: Závislost tlaku na čase při vstřikovacím cyklu v místě vstřiku

2.2 Formy pro vstřikování termoplastů /3/, /4/, /5/, /6/, /7/

Formy dávají tvar tuhnoucí tavenině, musí být proto navrženy tak, aby byl tento tvar zachován i po vyjmutí z formy. Formy lze rozdělit podle násobnosti, dle počtu dělicích rovin, podle toho, zda jde o formu pro vícekomponentní vstřikování, dle způsobu pohonu pohyblivých částí (mechanické, hydraulické, pneumatické,...), dle druhu pohybu pohyblivých částí (vytáčecí,...), dle tvaru rámu (kruhové či obdélníkové,...).

Obr. 2.4: Schéma jednoduché formy pro vstřikování termoplastů /3/

2.2.1 Složení forem /3/, /4/, /5/, /6/, /7/

2.2.1.1 Tvarové části /3/, /4/, /5/

Tvarové součásti jsou části forem, které se stýkají s povrchem výlisku (tvárník, tvárnice, jádra, vložky,...). Jsou vyráběny z kvalitních nástrojařských ocelí, které jsou tepelně zpracovány. Materiál tvarových částí musí být otěruvzdorný a dostatečně tvrdý, pevný a tepelně stabilní. Tvarové části jsou většinou složeny z menších vložek, popřípadě má každá tvarová dutina svoji tvarovou vložku pro snadnější výrobu a opravu.

2.2.1.2 Rám formy /3/, /4/, /5/, /6/, /7/

Rám formy slouží jako nosná konstrukce formy, je tvořen většinou deskovými součástmi. Rám formy má být dostatečně tuhý. Jednotlivé součásti rámu lze koupit jako normální a případně je upravit. Velikosti desek rámu jsou tvořeny normalizovanou řadou. K výrobě desek rámu jsou použity převážně nízkolegované oceli, kromě desek dělicí roviny.

2.2.1.3 Vyhazovací systém /3/, /4/, /5/, /6/, /7/

Vyhazovací systém je určen pro vyhození výlisku a vtokového zbytku na konci vstřikovacího cyklu. Vyhazovací systém je většinou tvořen vyhazovací deskou na které jsou uchyceny jednotlivé vyhazovače vedoucí do dutiny formy. Vyhazovačem je tvořena tedy část povrchu výlisku. Pohybem této desky se vyhodí výlisek popřípadě vtokový zbytek. Vyhazovací deska může být ovládána táhlem z lisu, popřípadě mechanicky programovou tyčí která je uchycena na tvárnici formy. Tvary vyhazovačů jsou většinou válcové, obdélníkové či mají tvar trupky. Pro velké a tenké tvary kde by normální vyhazovač nechal stopy nebo způsobil protržení je vhodné použít zavzdušňovací ventil (viz obr. 2.6). Při požadavku, aby vyhazovač nenechal na povrchu žádné stopy je možné použít vzduchový jehlový ventil. (viz obr. 2.5) .



Obr. 2.5: Jehlový ventil /5/

Obr. 2.6: Zavzdušňovací ventil /5/

2.2.1.4 Středící a vodící prvky /3/, /4/, /5/

Vodící a středící prvky jsou důležitou částí formy zabezpečují přesné dosednutí formy s minimální tolerancí. Tyto prvky jsou tvořeny soustavou čepů a pouzder. Vodící prvky je třeba během výroby neustále promazávat, pro snadný pohyb a nezadírání. Vodící, středící prvky jsou převážně nakupovány jako normálie.

2.2.2 Vtokové soustavy vstřikovacích forem /3/, /4/, /5/

Vtoková soustava souhrn všech kanálů a vtoků sloužících k přivedení taveniny z trysky vstřikovacího stroje do dutiny vstřikovací formy.

Vtokové soustavy lze rozdělit na vtokový systém studený, izolovaný, kombinovaný nebo vtokový.

Studený vtokový systém je nejlevnější na výrobu, ale jeho záporem je ze všech systémů největší podíl odpadu materiálu.

Izolovaný systém funguje díky předdimenzovanému průměru kanálu. Plast jakožto dobrý tepelný izolant ztuhne na povrchu kanálu a izoluje tak horkou taveninu uprostřed kanálu. Nevýhodou je, že tento systém po přestání lisování ztuhne a musí být rozebíratelný pro vyčištění.

Horký vtokový systém je složen z vyhřívaných rozváděcích desek a z horkých trysek, které dopravují taveninu do dutiny formy. Tavenina díky vyhřívání neztuhne. Horký vtokový systém nemá žádný odpad, ale je pro výrobu drahý.

Kombinovaný vtokový systém využívá všechny předchozí varianty.

2.2.2.1 Vtokové kanály /3/, /4/, /5/

Vtokové kanály vedou taveninu od místa jejího vstupu až po dutinu formy. Délka kanálů má být volena s ohledem na rovnoměrnost plnění tvarových dutin. S narůstající délkou rostou i tlakové ztráty, což kladně ovlivní kolísání technologických a materiálových parametrů při vstřikování. Geometrii vtokového kanálu volíme nejčastěji kruhovou nebo lichoběžníkovou, ty mají nejmenší teplotní a tlakové ztráty. Průměr kanálu v okolí vtokového ústí by neměl více než o 1mm přesáhnout tloušťku stěny vylisku. Pouze pro transparentní a termicky labilní materiály se doporučuje volit větší průměry kanálů. Další podmínkou správného vstřikování je dodržet v kanálech co nejkonstantnější průtočné rychlosti a nepřekročení kritické smykové rychlosti pro vstřikovaný plast. U vtokových kanálů je nutné se vyhnout hromadění materiálu, což by vedlo k narušení tepelné bilance formy a k případnému prodloužení doby chlazení. Při větvení kanálků je vhodné, aby kanál přesahoval rozváděcí kanálky a aby v takto vytvořeném slepém rameni zůstalo studené čelo taveniny. Pro vícenásobné formy je nutné volit správné odstupňování

průřezů jednotlivých kanálů. Pro složitější vtokové systémy je záhodno použít simulační analýzy, které samy navrhnu správný průměr kanálů.

2.2.2.2 Vtokové ústí /3/, /4/, /5/

Vtokové ústí je místo propojení vtokové soustavy s dutinou formy. Mělo by být umístěno tak, aby dráhy taveniny byly stejné, tedy v nejsilnější části výlisku (pro maximální dobu dotlaku). Poloha vtokového ústí ovlivňuje polohu studených spojů, orientaci makromolekul či plniva. Zásadou je vyhnout se studeným spojům v mechanicky namáhaných místech a na vzhledových plochách. Plnění podlouhlých tvarů je pro lepší orientaci makromolekul výhodnější z kratší strany nebo čela. Je záhodno umístit vtokové ústí tak, aby proud taveniny měl za vtokovým ústím překážku a zabránilo se tak volnému paprsku z důvodu turbulentního plnění.

Konstrukce vtokových ústí je co nejkratší, minimální délku ústí určují mechanické vlastnosti materiálu formy. Velikost průřezu ústí musí zajistit kvalitní naplnění dutiny formy. V oblasti vtokového ústí je většinou maximální hodnota smykové rychlosti, jenž by neměla překročit limit daný výrobcem materiálu. Vtoková ústí lze rozdělit dle typu na: kuželový vtok, bodový vtok, tunelový vtok, filmový vtok a banánový vtok.

2.2.2.2.1 Kuželový vtok přivádí taveninu do dutiny formy bez zúžení. Toto řešení je výhodné po stránce působení dotlaku. Je však nutné dodatečné odstranění takového vtoku, což zvyšuje náklady při výrobě. Tento typ vtoku je na ústupu, používá se spíše pro jednonásobné nástroje a pro tlustostěnné hmotnější díly.

Obr. 2.7: Kuželový vtok /4/

2.2.2.2.2 Bodový vtok je představitelem vtoku se zúženým vtokovým ústím. Vtokové ústí může ležet v dělicí rovině nebo mimo ni. Tento vtok je náchylný pro volný výstřik do formy, neboli jetting. Který lze potlačit nižší vstřikovací rychlostí, zaoblením ústí ze strany dutiny formy, řízením profilu rychlosti vstřiku (sekvence rychle-pomalů).

Obr. 2.8: Bodový vtok /4/

2.2.2.2.3 Tunelový vtok je velice používaný, jeho předností je oddělení vtokového zbytku během otevření formy. Pro jeho dobré odformování je nutná vysoká elasticita zpracovávaného materiálu. Vyrábí se převážně jiskřením, což zaručuje značnou geometrickou přesnost. Umístění vtokového ústí může být v pevné i pohyblivé části formy, v případě umístění v pevné části je odformování složitější kvůli nedostatku místa pro odpružení. Pro snadné vyhození je doporučená vzdálenost vtoku od jeho přidržovače čtyřnásobek průměru kanálu. Tunelový vtok lze umístit i do tenkých dílů či do žeber nebo pomocných náliček.

Obr. 2.9: Tunelový vtok /4/

2.2.2.2.4 Filmový vtok je používán pro tenkostěnné plošné díly. Filmový vtok zaručuje dobré podmínky pro dodržení rovnosti a přesnosti dílu, zvláště pro semikristalické plasty. Nevýhodou je nutné pozdější oddělení vtoků.

Obr. 2.10: Filmový vtok /4/

2.2.2.2.5 Banánový vtok je vhodný použít v případě, kdy potřebujeme přesunout vtok na místo, na kterém nevádí stopa po vtoku. Toto vtokové ústí lze použít pouze pro vysoce elastické plasty, které zaručují snadné vyjmutí vtoku. Pro banánový vtok je vhodné volit delší vedení vyhazovaného vtoku.

Obr. 2.11: Banánový vtok /4/

2.2.3 Odvzdušnění formy /5/, /6/, /7/

Pro správnou funkci formy je nutné, aby vzduch ve tvarové dutině měl kam při plnění taveninou unikat. Při nesprávném odvzdušnění dochází ke špatnému, pomalému plnění formy, k diesel efektu nebo k nenaplnění dílu. Rozkladem termoplastů se uvolňují štěpné produkty, v exponovaném místě se tvoří korozně působící nánosy. Při dalším vstřikováním může tento nános způsobit škody na nástroji korozi a zhoršení jeho odolnosti proti abrazivnímu namáhání. Velký vliv na odvzdušnění mají tvar výlisku, místo vstřiku a poloha tvarových dutin ve formě.

Obr. 2.12: Příklad odvzdušnění porézním jádrem /5/

Odvod vzduchu je u jednoduchých forem zprostředkován dělicí rovinou, kterou lze pro lepší účinnost odlehčit či rovinným hrubozrnným kotoučem přibrousit. Vzduch také uniká kolem vyhazovačů, na kterých je možné zhotovit vybrání pod povrchem dutiny sloužící jako úložiště vzduchu. Vzduch lze odvádět také porézními jádry.

Pro tloušťku odvzdušňovacích kanálů obecně platí, že jejich tloušťka nesmí způsobit přetoky na výstřiku. Stanovení tloušťky je závislé zejména na typu a viskozitě vstřikovaného materiálu, která navíc není v příslušné dávce taveniny konstantní, na délce toku taveniny, na konstrukci výstřiku, na nastavených technologických parametrech (zejména teplota taveniny, teplota formy, rychlost vstřikování, vstřikovací tlak, způsob přepnutí ze vstřikovací fáze na fázi dotlakovou, doba dotlaku, dotlak - tlaková úroveň). Obecně platí, bez ohledu na vstřikovaný materiál, že při požadavku na funkční odvzdušnění by jeho tloušťka neměla být větší než 0,018 až 0,02 mm při správné délce. Pro odvod vzduchu lze užít také odvzdušňovací ventily (viz obr. 2.5 a 2.6)

2.2.4 Temperace forem /5/, /6/

Pro úspornost vstřikovací formy je rozhodující, jak rychle a jak dobře probíhá tepelná výměna mezi nástrojem a vstřikovaným plastem.

Kvalita vstřikovaného dílu závisí na rozložení teplotního pole a průběhu teplotního pole během cyklu. Pro cenovou efektivitu výroby je důležité, aby forma dobře odváděla teplo. Optimalizace teplot je nejdůležitějším parametrem pro snížení výrobních nákladů. Lze uspořit cca 10-40% z celkové ceny.

Jestliže má být zachována kvalita dílu při zkrácení výrobního času, je nezbytné rozumět zákonům výměny tepla ve formě a tyto zákony vědomě využívat.

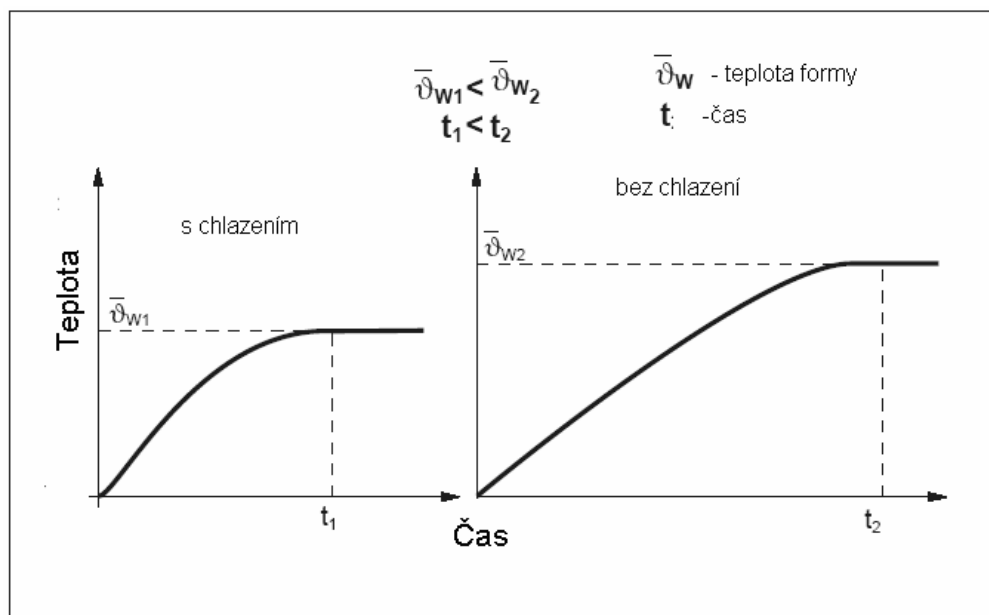
2.2.4.1 Význam chlazení / temperování forem /3/, /4/

Výrobci plastů doporučují optimální teploty pro zpracování (nebo rozsah teplot) a nejvhodnější teplotu formy pro daný materiál (viz tabulka 2.1)

V mnoha případech nejsou doporučené teploty dodržovány. Zpracovatelé preferují pracovat za nízkých teplot za účelem zkrácení cyklu, toto může však vést k zmenšení kvality vstřikovaných dílů.

Při vstřikování plastů se roztavený materiál periodicky vstřikuje do „chladné“ formy. Za předpokladu, že forma nemá žádné chlazení, se musí ohřát z důvodu tepla z roztaveného plastu. Takto se forma zahřeje až na ustálenou teplotu. Je velmi obtížné předpovídat teplotu ustálené formy a čas ustálení.

Na obr. 2.13 lze vidět srovnání stejných forem, jedna je však bez chlazení. Forma bez chlazení vykazuje vyšší teplotu a delší čas ustálení, na rozdíl od formy s chlazením, kde je čas ustálení dosažen poměrně rychle.

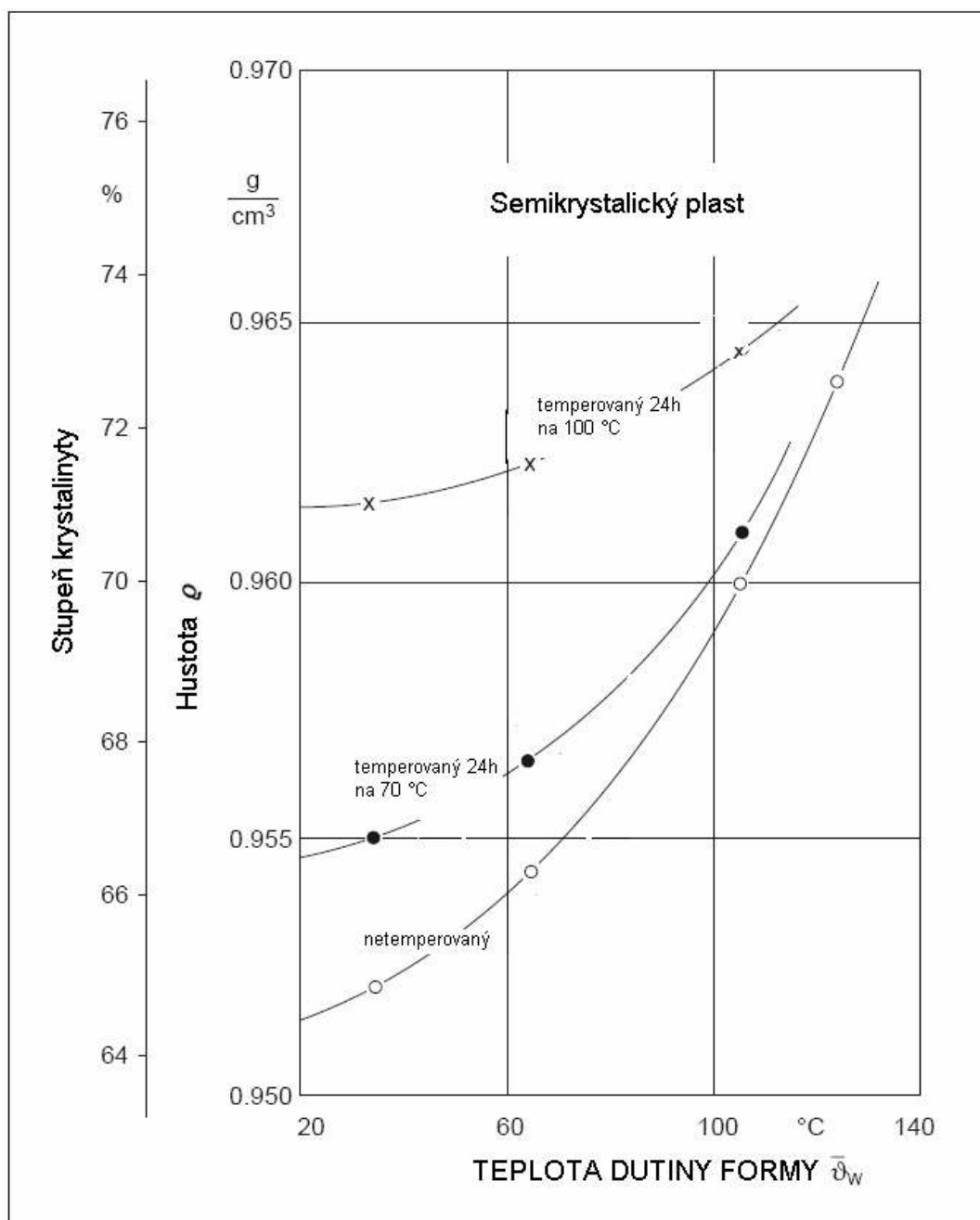


Obr. 2.13: Teplota dutiny formy (vlevo - v počáteční fázi lisování bez temperování, vpravo - s chlazením) /4/

Tab. 2.1: Doporučené teploty zpracování pro různé plasty /4/

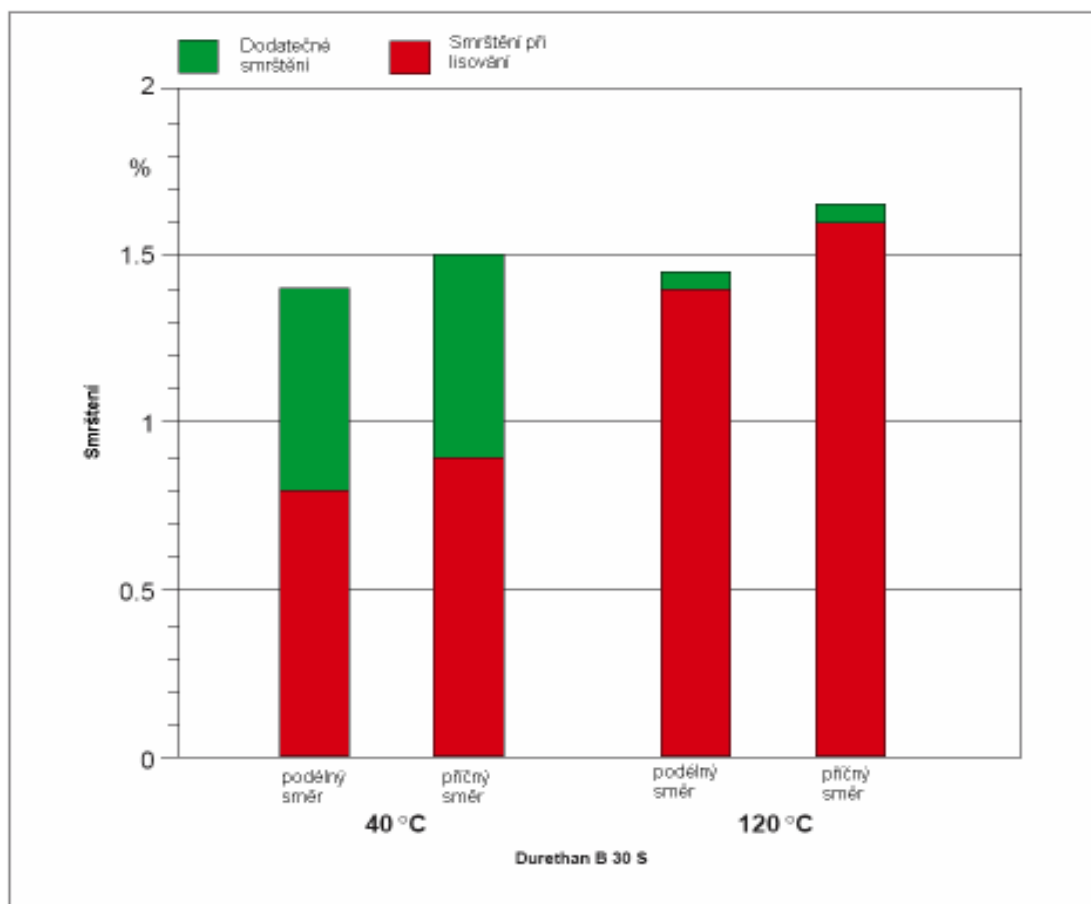
Označení materiálu	Teplota formy (°C)	Teplota taveniny (°C)	Teplota vyjmutí z formy (°C)
Apec®HT(PC-HT)	100 – 150	310 – 340	150
Bayblend® (PC+ABS)	70 – 100	240 – 280	110
Desmopan® (TPU)	20 – 50	190 – 245	50 – 70
Durethan® A (PA 66)	80 – 100	275 – 295	110
Durethan® B (PA 6)	80 – 100	260 – 280	100
Makrolon® (PC)	80 – 100	280 – 320	140
Makrolon® (PC, GF)	80 – 130	310 – 330	150
Novodur® ABS	60 – 80	220 – 260	80 – 100
Lustran® SAN	50 – 80	230 – 260	80 – 95
Pocan® (PBT)	80 – 100	250 – 270	140
Triax® (ABS+PA)	80 – 100	250 – 270	90 – 100

Vlastní teplota formy má obzvláště vysoký vliv na vlastnosti výlisku, jako jsou: kvalita povrchu, smrštění, vnitřní tlaky, vnitřní struktura nebo rozměrové odchylky. Pro dosažení vysokého stupně krystalinity u semikrystalických materiálů je nezbytné pracovat s vysokou teplotou dutiny formy. Nadměrné chlazení brání krystalizaci. Následující obr. 2.14 ukazuje, že stupeň krystalinity ostře klesá s teplotou dutiny formy. Tyto výlisky vykazují dodatečnou krystalizaci a s tím spojené smrštění.



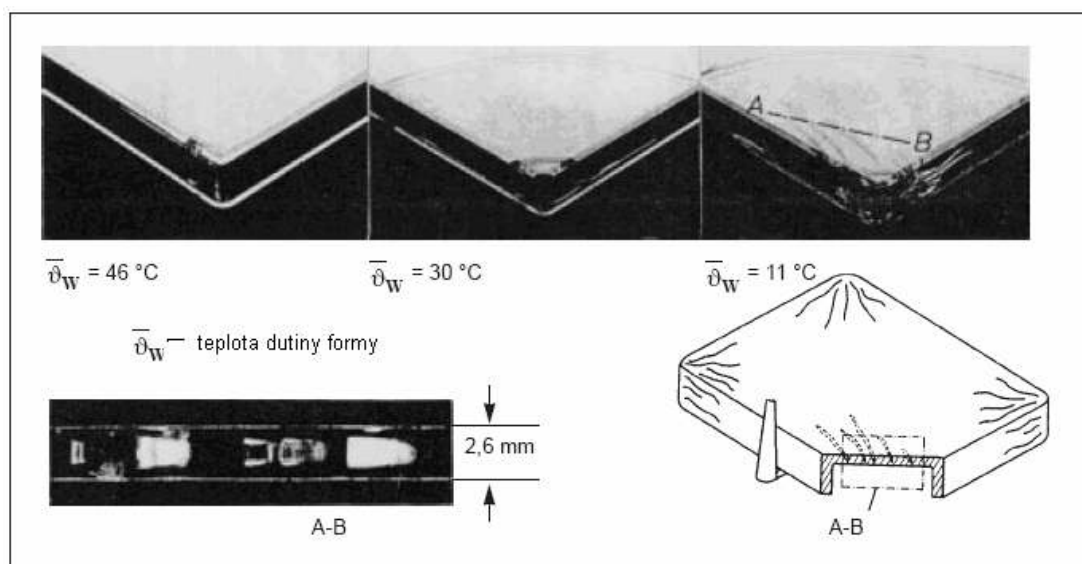
Obr. 2.14: Vliv teploty dutiny formy na hustotu a stupeň krystalinity vstřikovaného dílu /4/

Obr. 2.15 ilustruje, jak teplota dutiny formy ovlivňuje smrštění výlisku. Obrázek ukazuje celkové smrštění. Skládá se ze smrštění při lisování a ze smrštění dodatečného pro materiál PA 6 (Durethan® B 30 S). Je zřejmé, že při nízké teplotě dutiny formy je celkové smrštění nižší, zatímco velkou část tvoří smrštění dodatečné. Naopak při vyšších teplotách je celkové smrštění vyšší a je převážně tvořené smrštěním při lisování.



Obr. 2.15: Smrštění při lisování a smrštění dodatečné v závislosti na teplotě formy pro materiál PA6 Durethan® B 30 S, měřeno na desce 150x90x3 /4/

S nízkou teplotou dutiny se potlačuje krystalizace v semikrystalických materiálech, to může způsobovat vnitřní napětí v dílu. Obr. 2.16 ukazuje, že rohy dílu, které jsou citlivé na trhliny vzniklé z důvodů vnitřního napětí, vykazují nižší stupeň vnitřního pnutí spojené s vyšší teplotou dutiny formy.

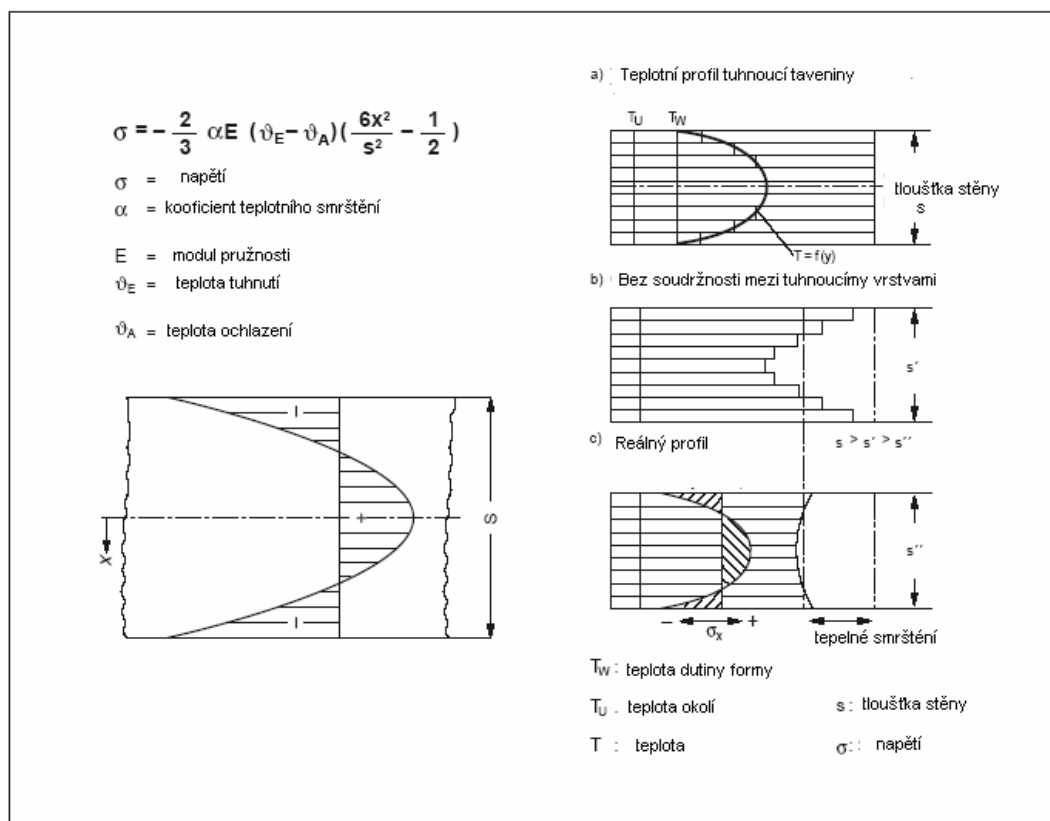


Obr. 2.16: Trhliny vzniklé vnitřním napětím při vstřikování amorfních materiálů v závislosti na teplotě dutiny formy /4/

Jak ukazuje obr. 2.16, vyšší teplota dutiny může redukovat množství trhlin vzniklé vnitřním napětím. Většina vnitřního napětí je důsledkem chlazení, velikost vnitřního napětí je popsána Stitzovým modelem tuhnutí (viz obr. 2.17 pravá strana).

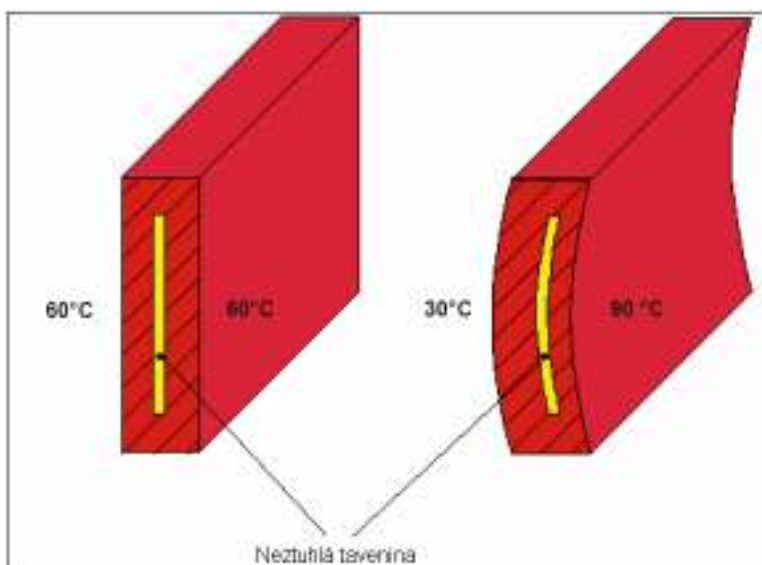
Strmý teplotní profil při tuhnutí vstřikovaného plastu (viz obr. 2.17a) má za důsledek různé smrštění ve vnitřních vrstvách dílu (viz obr. 2.17b). Mechanická soudržnost materiálu mezi jednotlivými vrstvami plastu brání skluzu a uvolnění napětí (viz obr. 2.17). Brzděné chladnutí způsobuje vnitřní pnutí v příčném směru.

Napětí od chlazení je možné určit dle Knappeho vztahu, který znázorňuje parabolický průběh v příčném směru (viz obr. 2.17 levá strana). Uprostřed dílu vzniká tahové namáhání a u povrchu dílu na základě zachování rovnováhy namáhání tlakové. Při užití Knappeho vztahu se nesmí zapomenout, že modul pružnosti a koeficient smrštění jsou funkcí teploty.



Obr. 2.17: Napětí způsobené chlazením dle Knapého, teplotní smrštění a vnitřní namáhání dle Stitzeho /4/

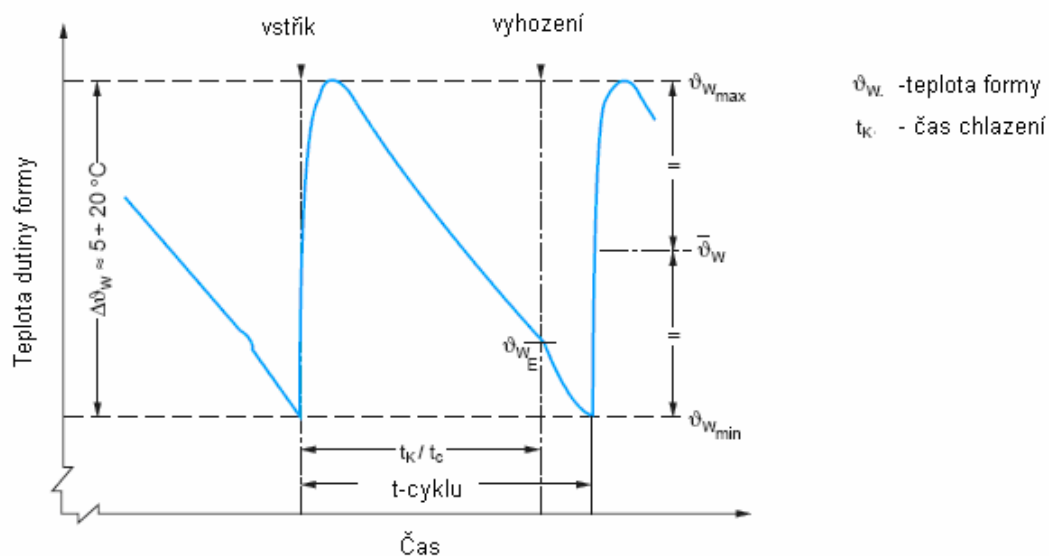
Rozdílná teplota formy může mít následek deformaci výlisku z důvodu rozdílného smrštění v závislosti na teplotě. Obr.2.18 znázorňuje princip deformace - studená strana vykazuje menší smrštění než teplá strana, což způsobuje zkroucení výlisku. Tento typ deformace se projevuje u tenkostěnných rovinných výlisků.



Obr. 2.18: Vliv teplot dutiny formy na deformaci výlisku /4/

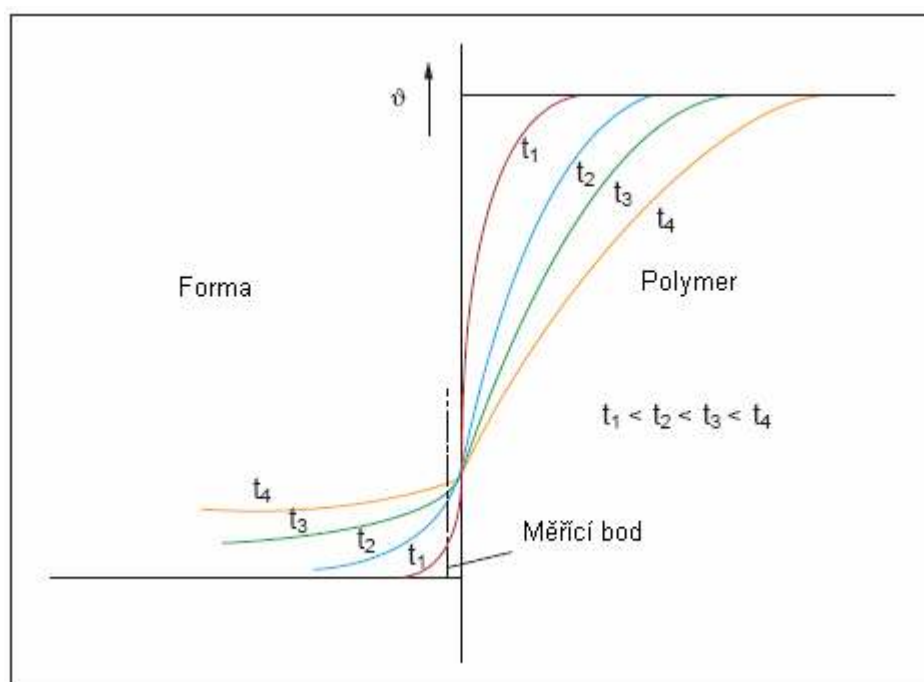
2.2.3.2 Teplotní profil na povrchu dutiny formy /3/, /4/

V předchozí části byla zmíněna průměrná teplota povrchu dutiny formy, ta však v určitém bodě cyklicky kolísá (viz obr. 2.19).



Obr. 2.19: Teplota povrchu dutiny formy během nepřerušované produkce /4/

Periodické kolísání teploty v dutině formy má fyzikální původ (materiál formy, vstřikovaný materiál, teplota taveniny), chladicí systém není schopen ovlivnit velikost amplitudy kolísání teploty.



Obr. 2.20: Vyrovnávání teploty mezi formou a polymerem /4/

Těsně před samotným vstřikem je teplota povrchu dutiny formy minimální (ϑ_{Wmin}). Při styku teplé plastové taveniny s chladnější stěnou formy je teplota maximální (ϑ_{Wmax}). Tato teplota směrem do středu formy (díky vyrovnávání teplot s chlazeným materiálem formy) klesá (viz obr. 2.19).

Teploty měřené v různých časech (t_1, t_2, t_3, t_4) v určitém místě v obr. 2.20 lze vyjádřit funkcí času, jak je ukázáno v Obr. 2.19.

Teplota dutiny formy klesá z maximální teploty ϑ_{Wmax} (viz obr. 2.19) během cyklu díky chlazení. Jakmile je výlisek vyhozen (ϑ_{WE} viz obr. 2.19), pokles teploty je rychlejší. Při ustáleném kvazi-stacionárním stavu je na počátku cyklu opět dosažena teplota ϑ_{Wmin} .

Kontaktní teplota ϑ_{Wmax} je funkcí tepelné permeability b formy a vstřikovaného materiálu a může být vyjádřen vztahem:

$$(2.1)$$

Číselná hodnoty prostupu tepla pro vybrané materiály lze vyčíst v tabulce 2.2.

Tab. 2.2: Tepelný prostup u vybraných materiálů forem a plastů /4/

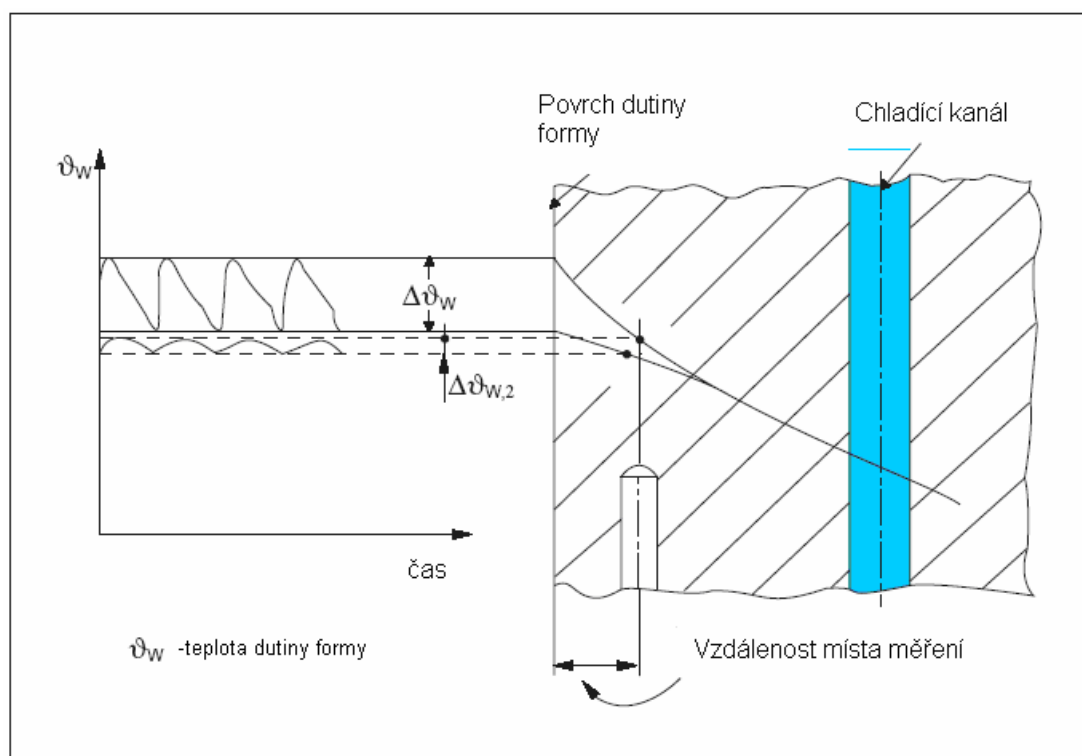
Materiál	Tepelná permeabilita b $Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$
Slitina Berilia, Mědi (BeCu 25)	17.2×10^3
Nelegovaná ocel (C 45 W 3)	13.8×10^3
Chromová ocel (X 40 Cr 13)	11.7×10^3
Polyethylen (PE-HD)	0.99×10^3
Polystyren (PS)	0.57×10^3

Z hodnot uvedených v tabulce 2.2 je zřejmé, že kovy mají vyšší tepelný prostup než termoplasty. S vyšším obsahem legur v oceli klesá tepelný prostup a roste kontaktní teplota $\vartheta_{W_{\max}}$ na rozdíl od dobře tepelně prostupných materiálů (vložky BeCu).

Průměrná teplota povrchu formy ϑ_W je důležitá pro stanovení chladicího času a pro určení chladicího výkonu.

(2.2)

Amplituda teploty $\Delta\vartheta_W$ klesá s rostoucí vzdáleností od povrchu tvarové dutiny. Tento poznatek je nutné rozvážit pro umístění čidla při měření teploty formy (viz obr. 2.21).



Obr. 2.21: Pokles amplitudy teploty v závislosti na vzdálenosti od povrchu dutiny formy /4/

Průměrná teplota dutiny formy ϑ_W je jednou z hlavních proměnných při tepelném návrhu formy. V případě, že je tato teplota dosažena v celé oblasti formy, zajišťuje chladicí systém identické podmínky chlazení.

2.2.3.4 Výpočet doby chlazení

Doba chlazení lze určit zjednodušeně dle nomogramů. Pro idealizované modely lze tuto dobu i spočítat. Pro optimální dobu chlazení je záhodno použít simulační software. Lze také použít metodu pokusů a omylů.

2.2.3.5 Způsob temperace /3/, /4/

Nejčastějším způsobem chlazení forem je chlazení vodou (či olejem pro vyšší teploty), která cirkuluje okolo tvarových dutin v kanálech. Nejčastějším tvarem kanálů je tvar kruhový – především pro snadnou výrobu. Kanály je vhodné nevětvit, aby byl určen směr a množství toku média. Průměr kanálu s cirkulující vodou by neměl být menší než 6 mm, z důvodů zarůstání a zaškrcování průtoku. Pro méně přístupná místa je vhodné použít chladicí přepážky, fontánky či tyčinky. Pro chlazení ve stísněných prostorech lze využít proudění stlačeného vzduchu.

2.3 Simulační software Moldflow Plastics Insight /9/

Moldflow Plastics Insight® (mpi®) software reprezentuje komplexní soupravu nástrojů pro simulaci, optimalizaci a ověřování plastických dílů a jejich forem. Mpi nabízí devatenáct odlišných modulů k simulaci devíti specifických lisovacích procesů.

2.3.1 Výhody použití analýzy /9/

Výhodou použití této analýzy je vyhnutí se vysokým nákladům a časovým prodlevám spojeným s problémy na začátku výroby. Pomáhá při výběru materiálu, optimalizování geometrie dílu, konstrukci formy, navržení správných technologických podmínek - všechny tyto parametry ovlivňují optimalizaci dílu.

Používáním analýzy k simulaci vstřikování plastů lze vyčíslit a optimalizovat vzájemné ovlivňování parametrů během konstrukční fáze projektu, před započítáním výroby, kde je minimální změna ceny a přitom maximální účinek změny.

S analýzou mpi se dá simulovat plnění, tuhnutí a chlazení termoplastů při jejich lisování s ohledem na to, zda je materiál plněn či ne, právě tak jako simulace

následných deformací dílu. Dá se tedy simulovat tok materiálu a předcházet nežádoucím reakcím lisovacího procesu.

Mpi také nabízí největší materiálovou databázi svého druhu s více než 7 800 druhů termoplastů, reaktoplastů, chladicích médií, materiálů vstřikovacích forem a vstřikolisů.

Mpi je uznáván pro svoji rychlost a přesnost. Je určen pro návrh geometrie dílu a pro řešení otázek spojených s lisováním plastů.

2.3.2 Volba geometrie /9/

Mpi je velice účinný díky svým širokým možnostem výběru typu výpočtového modelu. Mpi podporuje práci se třemi výpočetními modely reprezentujícími simulovaný díl: Midplane, Fusion, 3D.

2.3.2.1 Tradiční Midplane výpočtový model /9/

Midplane reprezentuje trojrozměrný objekt pomocí střednicové plochy a k ní přiřazené tloušťky. Použití Midplane je vhodné pro tenkostěnné díly. Pro díly, kde je těžko určitelná síla stěny (např. tyčka - střednicovou plochou je přímka) je tento model nevhodný. Pro zvětšení produktivity při tvorbě Midplane může být použit automatický generátor Midplane, který vytvoří model střední plochy, přiřadí odpovídající tloušťku a tím zabezpečí přesnost výsledku analýzy. Výpočet s tímto druhem modelu je oproti ostatním modelům nejrychlejší.

2.3.2.2 Fusion výpočtový model /9/

Mpi/Fusion řešení je založeno na Moldflow patentovanou Dual Domain™ technologií, která reprezentuje trojrozměrný díl pomocí vnějšího povrchu dílu, který je importován z CAD modelu jako je IGES nebo STL. Povrch dílu je reprezentován sítí trojúhelníků, síla stěny je počítaná ze vzdálenosti protilehlých uzlů těchto trojúhelníků. Může ovšem nastat odchylka od reality u zakřivených ploch např. u válcového typu dílu. Pro reálný výpočet je doporučen minimální podíl přiřazení síly stěny 80% objemu modelu. S tímto výpočtovým modelem ve verzi programu 5.1 lze

sledovat pouze hodnoty na povrchu dílu a průměrné hodnoty uvnitř dílu, spojitě hodnoty v celém objemu s tímto výpočtovým modelem nelze vyhodnotit.

2.3.2.3 3D Výpočtový model /9/

Mpi/3D používá osvědčeného řešení techniky založeném na metodě konečných prvků objemovou sítí. Mpi/3D elementy objemové sítě jsou čtyřstěnné jehlany. Tento model je vhodný pro komplexní výsledky, umožňuje nahlédnout přímo do dílu. Nevýhodou tohoto modelu je časová náročnost při výpočtech.

2.3.3 Možnosti simulace /9/

Mpi software poskytuje hloubkové řešení potencionálních problémů při výrobě a optimalizuje konstrukci dílu. Mpi analýza poskytuje konečné řešení pomocí nejmodernějších poznatků.

Mpi/Synergy je pre, post-processor, který podporuje všechny moduly analýz. Mpi/Synergy nabízí silné a účinné nástroje pro modelování, tvorbu sítě, editaci sítě, nastavení procesu, kontrolu výpočtu, zobrazení výsledků a tvorby měřicí zprávy ve snadno ovladatelném prostředí.

2.3.3.1 Plastic Flow /9/

Mpi/Flow simuluje plnicí a tuhnoucí fázi při vstřikování dílu, pro zajištění kvality dílu, stability a účinnosti procesu. Použitím Mpi/Flow se dá optimalizovat umístění vtoků, vyvážení vtokového systému, nastavení technologického nastavení lisování a geometrie dílů.

2.3.3.2 Mpi/Gas /9/

Mpi/Gas simuluje technologii GIT, kde se nejprve do formy vstříkne tavenina plastu a pak se do ní přivede plyn, který v dílu vytvoří síť dutin. Mpi/Gas vytvoří model dílu včetně tloušťky materiálu, pomůže s umístěním vtoku, při volbě množství vstřikovaného plastu i při vyvážení vtokové soustavy, umístění přívodu plynu a během technologického nastavení procesu.

2.3.3.3 Mpi/Co-Injection /9/

Mpi/Co-Injection simuluje sendvičové vstřikování. Do formy se nejprve vstříkne materiál, který má být na povrchu, a poté materiál, který tvoří jádro dílu. Díky simulaci lze zjistit rozložení materiálu v dílu při plnění. Výsledky poslouží k optimalizaci kombinace a poměru materiálu pro snížení ceny dílu.

2.3.3.4 Mpi/Injection Compression /9/

Mpi/Injection Compression simuluje kompresní vstřikování, kdy se do pootevřené formy vstříkne materiál, poté se dovře forma. Dotlak je způsoben pomocí uzavírací jednotky. Mpi/Injection ukáže jednotlivé fáze vstřiku. Výsledky slouží při volbě správného materiálu, geometrie dílu, navrhnutí formy a technologických podmínek.

2.3.3.5 Mpi/MuCell /9/

Mpi/MuCell simuluje proces, kdy se do taveniny termoplastu na šneku přivede nadkriticky prchavá látka, jako je oxid uhličitý nebo dusík. Plyn v tavenině způsobí, že vnitřek výlisku je pěnový a vnější povrch je tvrdý. Simulací lze vyhodnotit proveditelnost a výhody proti klasickému vstřikování. Z části lze optimalizovat konstrukci výlisku a hodnotit různé výsledky analýzy.

2.3.3.6 Optimalizační simulace vstřikovacího procesu /9/

2.3.3.6.1 Mpi/Design-of-Experiments /9/

Mpi/Design-of-Experiments vypracovává automaticky sekvenci rozborů na základě vámi specifikovaných parametrů, jako jsou teplota formy a taveniny, doba vstřiku a dotlaku a tloušťky dílu. Program automaticky uspořádá sekvenci experimentů a statisticky analyzuje výsledky, které pomohou optimalizovat parametry zpracování a výlisku. Výsledky zahrnují ukazatele kvality, tedy objemové smrštění, vstřikovací tlak, uzavírací sílu, plnicí čas, vstřikovací tlak a teplotní rozdělení.

2.3.3.6.2 Mpi/Optim /9/

Mpi/Optim je nástroj, který napomáhá nastavit vstřikovací stroj, nástroj, který bere v úvahu jeho parametry, skutečnou časovou odezvu stroje, maximální vstřikovací kapacitu, počet schodů, které mohou být naprogramovány v rychlostním a tlakovém profilu.

2.3.3.7 Mpi/Cool /9/

Mpi/Cool poskytuje nástroje pro modelování chladících okruhů, vložek, rámu kolem výlisku a analýzu efektivity chladicího systému formy. Mpi/Cool pomáhá optimalizovat formu a chladicí okruhy k dosažení stejnoměrného chlazení výlisku, eliminaci deformace výlisku v důsledku chladnoucích faktorů, minimalizaci času cyklu, snížení celkových výrobních nákladů.

2.3.3.8 Simulace strukturní integrity /9/

2.3.3.8.1 Mpi/Warp /9/

Mpi/Warp předpovídá smrštění a deformaci plastového výlisku. Je taky možné určit prostorovou úchylku z důvodu nejednotnému rozdělení napětí. Mpi/Warp pomáhá porozumět příčinám pokřivení, ukazuje výskyt a velikost deformace. Slouží k optimalizaci konstrukce dílu, při volbě materiálu a nastavení technologických podmínek.

2.3.3.8.2 Mpi/Fiber /9/

Mpi/Fiber předpovídá orientaci plnicích vláken při plnění tvarové dutiny, mechanické vlastnosti dílu v závislosti na orientaci vláken. Je důležité znát orientaci vláken z důvodu nestejného smrštění v podélném a příčném směru vláken a následné deformaci dílu.

2.3.3.8.3 Mpi/Shrink /9/

Mpi/Shrink předvídá smrštění dílu na základě specifických dat ohledně materiálu a technologických podmínkách vstřikování a nabízí reálnou předpověď lineárního smrštění nezávislého na deformaci. V důsledku chladnutí dílu se materiál smrští a to může být kritické pro toleranci rozměrů.

2.3.3.8.4 Mpi/Stress /9/

Mpi/Stress předpovídá chování plastového dílu po vstříknutí do formy, kdy je vystaven různým vlivům vnějšího namáhání. Analýza vyhodnocuje efekty toku materiálu během vstřikování a výsledné mechanické vlastnosti strukturní integrity dílu.

2.3.3.9 Simulace vstřikování reaktoplastu /9/

2.3.3.9.1 MpiReactive Molding /9/

Mpi/Reactive Molding simuluje tok a tvrzení v různých vstřikovacích procesech, včetně vstřikování pryže, termosetu a RTM/SRIM aplikací. Výsledky lze použít pro zhodnocení vyrobiteľnosti, minimalizaci času cyklu a optimalizaci podmínek zpracování.

2.3.3.9.2 Mpi/Microchip Encapsulation /9/

Mpi/Microchip Encapsulation simuluje zalévání polovodičových čipů s reaktivními pryskyřicemi.

3. Experimentální / praktická část

3.1 O společnosti Siemens AG /8/

Siemens patří mezi největší globální elektrotechnické a elektronické koncerny. Společnost zaměstnává téměř 461 000 odborníků, kteří vyvíjejí a vyrábějí produkty, navrhují komplexní řešení na míru dle požadavků zákazníků a nabízejí širokou paletu služeb dle jejich individuálních potřeb. Siemens nabízí svým zákazníkům ve 190 zemích inovativní technologie a komplexní know-how. Společnost byla založena před 155 lety a působí v oblastech informace a komunikace, automatizace a pohonů, energetiky, dopravy, zdravotnictví a osvětlení. V obchodním roce 2004/2005 společnost dosáhla tržeb 75,445 miliard EUR a čistého zisku 3,058 miliardy EUR.

3.1.1 Siemens VDO Automotive /8/

Siemens VDO Automotive patří mezi přední světové dodavatele elektronických, elektrických a mechatronických výrobků pro automobilový průmysl. Hlavními zákazníky jsou: VW-Group, Daimler Chrysler, GM-Opel, BMW, Ford, Scania, Porsche. V ČR působí od roku 1994. Dceřiná společnost má centrální závod v Brandýse nad Labem. Další pobočky se nacházejí ve Frenštátu pod Radhoštěm, Adršpachu a Mladé Boleslavi.

Obr. 3.1: Závod Adršpach /8/

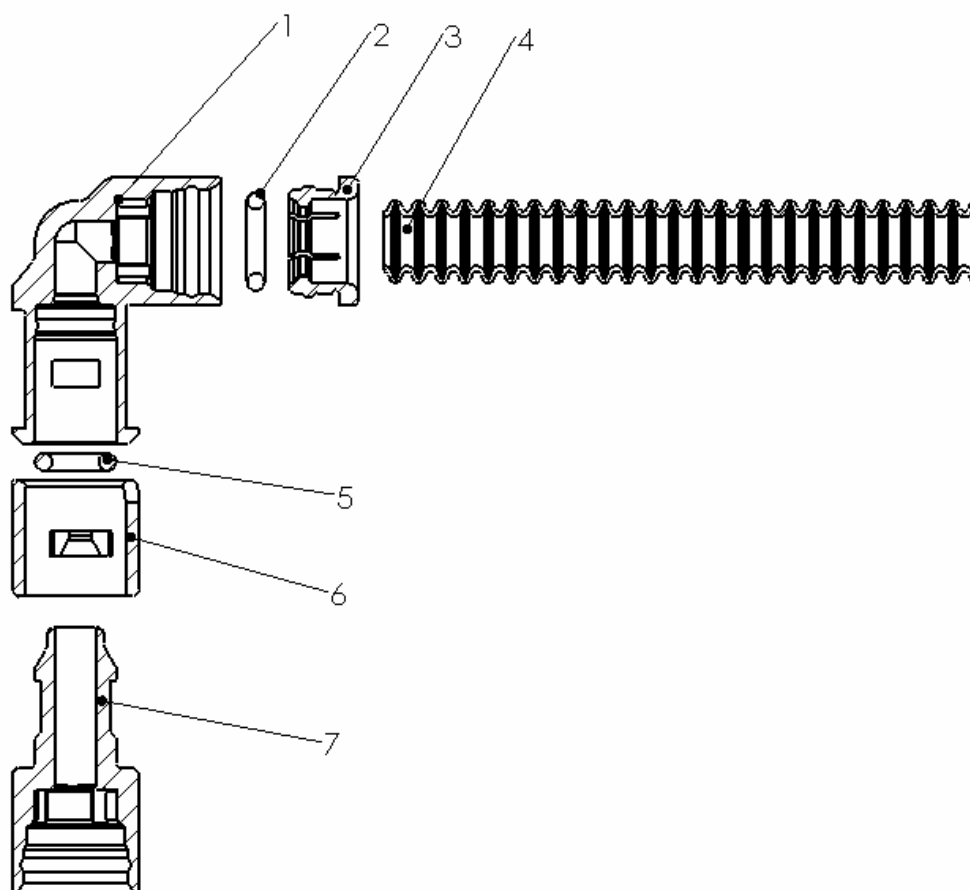
3.1.1.1 Produkty /8/

Siemens VDO Automotive v České republice vyrábí, dodává a instaluje komponenty pro automobilový průmysl, jeho produkty jsou určeny pro tuzemské i zahraniční trhy. Siemens VDO Automotive v ČR vyrábí a dodává: elektronické řídicí moduly, elektromechanické řídicí moduly, senzory, ovládací panely, palivové dopravní jednotky, autorádia, navigační systémy, ložisková víka.

Obr. 3.2: Palivové systémy vyráběné v Adršpachu /8/

3.2 Vybraný díl /8/

Vybraný díl mezikus (Zwischensteuck) je určený pro automobilový průmysl. Tento díl slouží jako segment hadicového systému. Médiem, které proudí v tomto hadicovém systému, je voda či směs do ostřikovačů. Tento díl kombinuje třetí a druhou generaci hadicových spojení. Druhá generace slouží k napojení na mezikus s koncovkou „pilzkopf“, na který většinou navazuje trubka s hladkým ukončením a třetí generace umožňuje spojení s vlnkovou trubicí (wellor). Druhá generace spoje se skládá z převlečného kroužku poz. 6 s aretací pilzkopfu, z těsnicího kroužku poz. 5, který je umístěn mezi pilzkopfem a mezikusem. Jeho poloha je určena vnitřním přesazením mezikusu a pilzkopfem poz. 5. Třetí generace spoje se skládá z pružného spreizrighu poz. 2, jenž se před montáží nasadí na wellor poz. 4. Mezi mezikus a wellor je umístěno těsnění poz. 3. Výroba a materiál hladké trubky jsou dražší než u vlnové trubky, cena třetí generace spoje je dražší než druhé generace. Z těchto důvodů se dávají spoje třetí generace jen od určité délky hadice.



Obr. 3.3: Schéma hadicového systému

3.3 Materiál Hostaform C 13031 /9/, /10/, /11/

3.3.1 Specifikace materiálu /9/, /10/, /11/

Výrobce: Ticona (Europe).

Druh plastu : Polyoximethylén (POM) .

Struktura: semikrystalický

Jedná se o vysoce krystalický inženýrský termoplast s vyváženými vlastnostmi a cenou výhodnější než u ostatních materiálů. Hostaform nabízí velkou pevnost a tuhost při širokém rozsahu teplot a houževnatost při -40°C . Hostaform produkty mají znamenitou rozměrovou stálost, dlouhodobou odolnost proti creepu i proti únavě. Hostaform je výjimečný také v odolnosti proti navlhavosti, chemikáliím a palivům - včetně paliv s vysokým obsahem methylalkoholu. Proto je široce

použitelný pro vstřikování plastů a také pro jiné konvenční zpracování jako vytlačování, lisování, odstředivé lití a vyfukování. Hostaform je také vhodný pro dvoukomponentní tvrdo-měkké vstřikování s termoplastickým elastomerem. Využití Hostaformu je možné v mnoha aplikacích – např. převodovky, pružiny, svorky a těsnění v palivovém systému, hračky, pračky, elektrické zubní kartáčky a holicí strojky, části vodovodních baterií a zámků bezpečnostních pásů (viz obr. 3.4). Hostaform se vyrábí také jako polotovar (desky, kvádry, pruty) k dalšímu obrábění s přesnou tolerancí.



Obr. 3.4: Příklady využití materiálu Hostaform. /11/

3.3.2 Doporučené hodnoty zpracování:

Teplota formy: 90°C

Teplota taveniny: $T_t = 210^\circ\text{C}$ (meze 190-230°C)

Teplota vyhození: $T_v = 125^\circ\text{C}$

Maximální smykové napětí: 0,45 MPa

Maximální smyková rychlost: 40000 s^{-1}

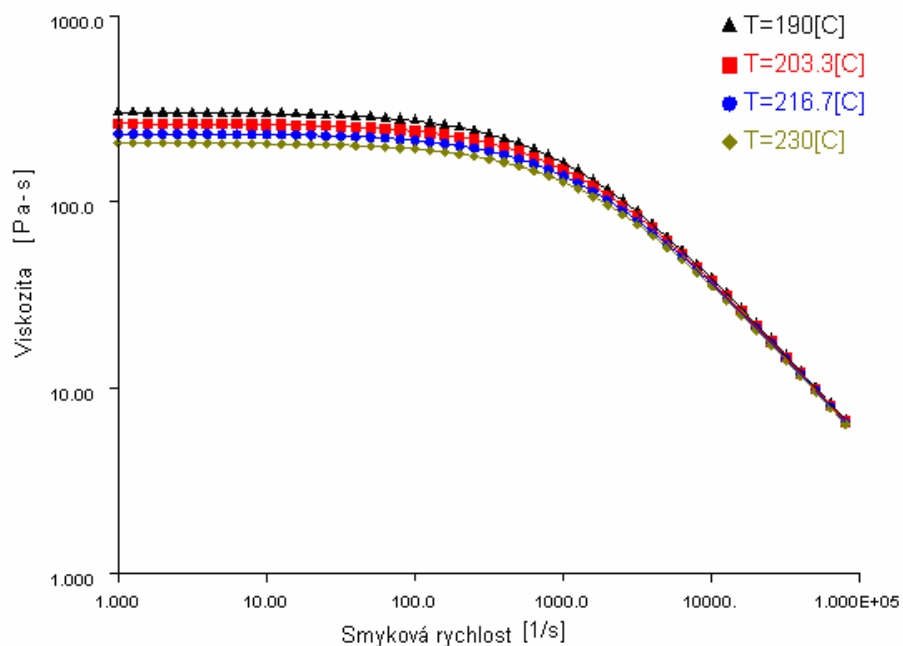
3.3.3 Mechanické vlastnosti

Modul pružnosti: 1740 MPa ve směru tečení, 1740 MPa v příčném směru

Modul ve smyku: 619 MPa

Doporučené smrštění 2,1%

3.3.4 Reologické vlastnosti:



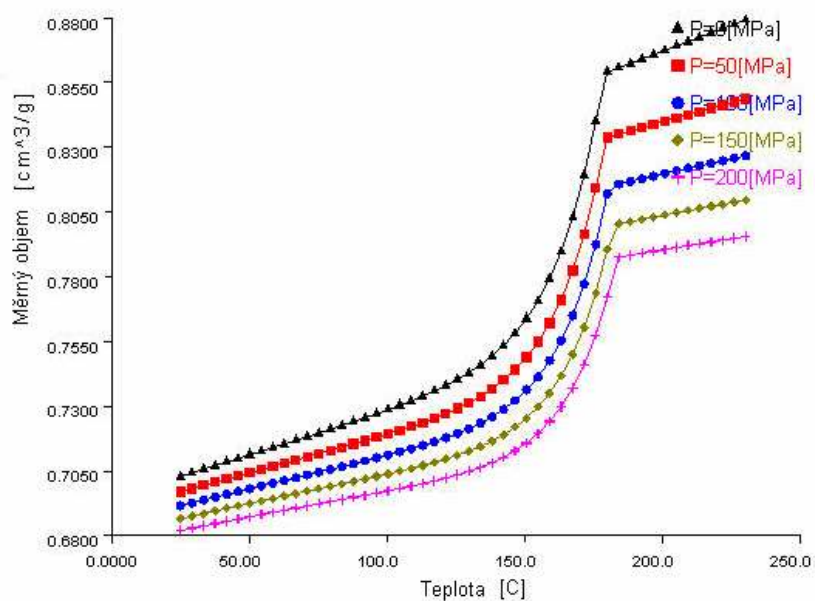
Obr. 3.5: Závislost viskozity na smykové rychlosti. /9/

3.3.5 pvT vlastnosti /9/, /10/, /11/

Hustota taveniny: $x = 1.1478 \text{ g/cm}^3$

Hustota pevné fáze: $\rho = 1.4227 \text{ g/cm}^3$

Teplota tuhnutí cca 146 °C



Obr. 3.6: pvT diagram. /9/

3.4 Konstrukce formy /4/, /6/, 12/

3.4.1 Software pro konstrukci formy /12/

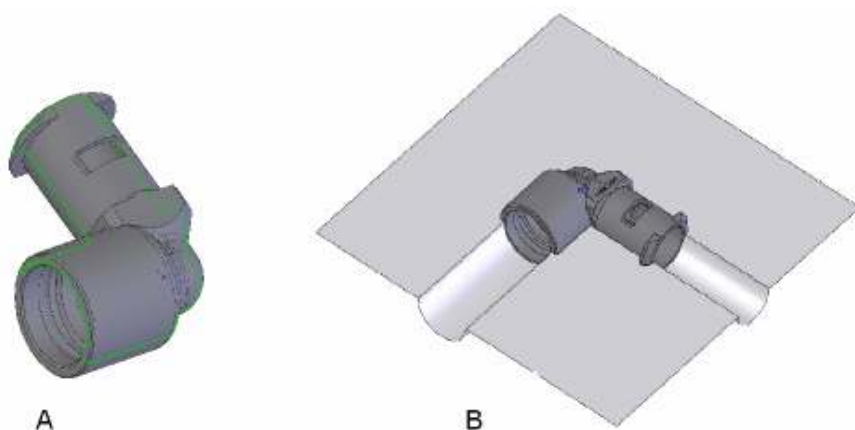
V konstrukci VDO Adršpach je pro tvorbu forem zaveden software SOLIDWORKS. Tento software je vybaven kvalitním 3D modelářem, má propracované nástroje pro práci s plochami. Umožňuje pracovat s víceobjemovými prvky a nabízí speciální funkce pro konstrukci forem.

Postup odformování : 1) Načtení modelu.

- 2) Tvorba dělicí křivky (viz obr. 3.7 A).
- 3) Uzavírací povrch (viz obr. 3.7 B) rozdělí povrch dílu na plochy, které se mají otisknout do tvárníku a do tvárnice, uzavírací povrch okolo dílu lze vytvořit automaticky pro jednodušší tvary nebo manuálně – použito v tomto případě.
- 4) Oddělení jader od tvárníku či tvárnice.
- 5) Uložení jednotlivých těl dílu do samostatných souborů.

Tento způsob odformování je výhodný pro následné úpravy, kdy se spolu se změnou na geometrii dílu automaticky změní i geometrie tvarových částí formy, včetně pohledů ve výkresech a kótách.

3D data normálií Hasco byla exportována softwarem "HNM 3D universal module", kde jsou k jednotlivým dílům k dispozici i zástavbové objemy, kterými lze odečítat objem ve formě, což urychluje samotnou konstrukci.



Obr. 3.7: Dělicí křivka, dělicí povrch.

3.4.2 Příprava modelu dílu /12/

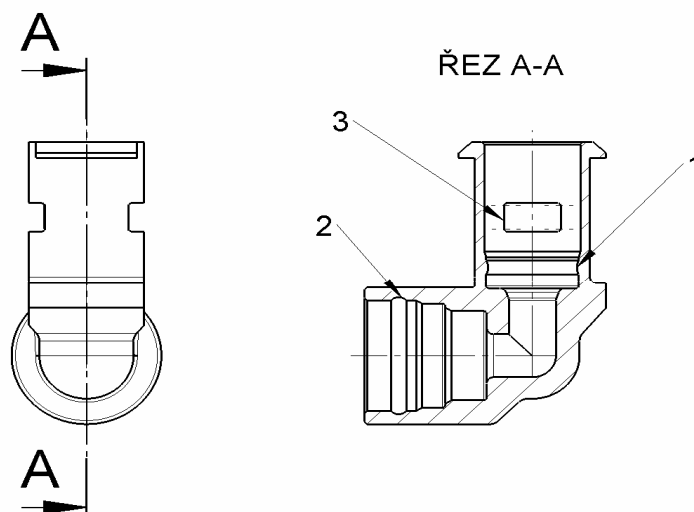
Před započítím vlastní konstrukce lisovací formy je nutné nejdříve upravit či vyrobit 3D model daného dílu podle výkresu zadavatele. V tomto případě byl model stáhnut z informační podnikové sítě. Stáhnutý model byl v "Pro E" formátu. Rozměry dílu byly v nominálních hodnotách. Model je nutné upravit ve většině případu na střed tolerance s úvahou na rozměrové obvody. U tvarů, kde se daný díl přetahuje přes vnitřní přesah (zde 2x vnitřní přesah), se rozměry modelu posouvají na krajní hodnotu či až nad toleranční mez, dle zkušeností s podobnými tvary. Pro úpravu modelu je vhodné použít stejný software, ve kterém byl model vytvořen, tedy "Pro E". Úprava modelu končí objemovým zvětšením o smrštění materiálu. V tomto případě jsem volil ve všech směrech stejné smrštění, což je dané specifickostí materiálu. Velikost smrštění je 2.1% pro použitý materiál POM-C. Takto upravený model byl exportován do vhodného 3D formátu (parasolid.xt), jenž podporuje software SOLIDWORKS, ve kterém je forma konstruována.

3.4.3 Rozbor dílu a volba typu formy /6/, 12/

Dle objednávky zadavatele má být forma dvojnásobná.

Vyráběný díl je ve tvaru L s dvěma rotačními rameny. Díl je rotačně průchozí. U vnitřních tvarů jsou dva přesahy (viz poz. 1,2 obr. 3.8), které komplikují odformování. Vnitřní tvary jsou odformovány dvěma rotačními jádry, při vyjíždění těchto jader je vhodné mít vnější tvary už uvolněné, aby se mohl při přetahování přesahů díl roztáhnout. V opačném případě by přesah více poničil tvary ve směru vytahování jader.

Díl obsahuje dvě okna (viz poz. 3. obr. 3.8), pro která je z důvodů výroby (jednodušší jiskření tvarů a lepší spasovatelnost) vhodné vyrobit samostatná jádra.



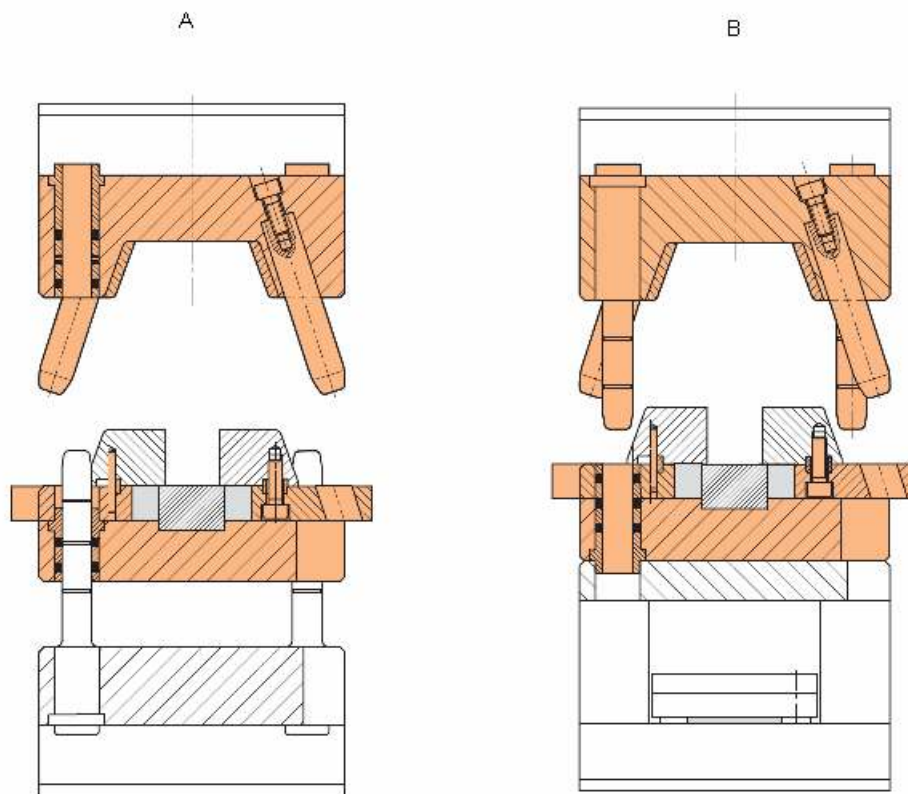
Obr. 3.8: Rozbor dílu.

Pro odformování vnějších tvarů je zvolena čelistová forma, která zajišťuje uvolnění proti vytažení vnitřních jader. Orientace výlisku ve formě je vertikální. Natočení výlisku ve formě je voleno tak, aby po rozevření čelistí zůstal výlisek na ramenu s větší tloušťkou materiálu, tak, aby rameno s oknem směřovalo na bok formy.

Typ čelistové formy byl volen z typů A-K2500 a B-K2501 (viz obr. 3.9). Čelistový komplet je složen z dílů (viz červené díly obr. 3.9), u kompletu je zajištěna mechanika pohybu čelistí a veškeré spasování, což snižuje časovou náročnost výroby formy a zvyšuje kapacitu nástrojárny.

Typ A nedisponuje vyhazovací deskou a vyhození-setření je provedeno pohybem střední částí formy napojené na vyhazování lisovacího stroje.

Typ B disponuje vyhazovací deskou. Cenově jsou obě varianty podobné. Pro tuto konstrukci byla volena varianta B.



Obr. 3.9: Typy čelistových forem Hasco. /6/

3.4.4 Volba umístění vtoku

Umístění vtokového ústí se odvíjí od orientace výlisků ve formě a od samotné geometrie výlisku, v našem případě je vtok vhodné umístit do zesíleného místa na válcovém povrchu dílu (viz obr. 3.10).

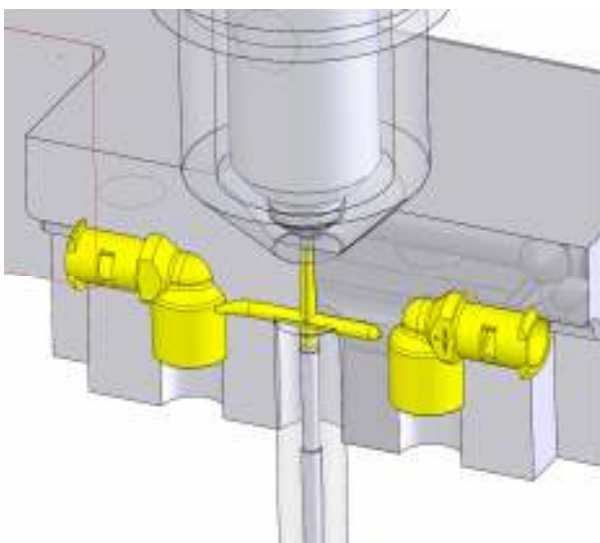
3.4.5 Vtoková soustava /6/

V rámci minimalizace vtokového zbytku je pro vtok volena horká tryska, která přivádí roztavený plast do vtokového kuželu blíže k samotným výliskům. Horká tryska je volena dle parametrů – typ materiálu, celková hmotnost jednoho vstřiku, umístění vtoku, typu ústí a dle zástavbových rozměrů.

Horká tryska je od firmy HASCO. Dle katalogu byla vybrána vhodná tryska – Z34201/32x80 (viz poz. 73 příloha 1).

Daná tryska disponuje výkonem 400 W, vtokové torpédo je ze slitiny Cu, Co, Be, je neuzavíratelná, obsahuje teplotní čidlo Fe, Cu-Ni.

Tryska je připojena ve formě na standardně používanou zásuvku poz. 72 příloha 1. Pro zajištění ochrany proti mechanickému poškození trysky, kdy při otevření formy ční ven tryska, je kolem trysky zhotoveno pouzdro (viz poz. 33 příloha 1). Vtokový kanál je kruhového průřezu z důvodu rozjždění do čtyř stran a dle doporučené literatury a zkušeností s obdobnými výlisky je volen průměr 2.5 mm. Samotný vtok do dílu je volen tunelový, s průřezem 0.65mm^2 , velikost ústí je volena na základě hmotnosti dílu a zkušeností. Vlastní geometrie vtoku je patrna z obr. 3.11.



Obr. 3.10: Vtokový systém.

Obr. 3.11: Geometrie vtokového ústí.

Oddělení vtokové soustavy od výlisku probíhá při otevírání formy, když odjíždějí čelisti od sebe, trhají vtok, ten zůstává jistěn díky vnitřnímu vybrání přidržovače vtoku (viz poz. 34 příloha 1).

Vtok jednotlivých výlisků je umístěn do rozdílných stran, aby bylo odlehčeno přidržovači vtoku. V něm je integrován vyhazovač (viz poz. 44 příloha 1), který při pohybu vyhazovacích desek vyhodí vtokový zbytek.

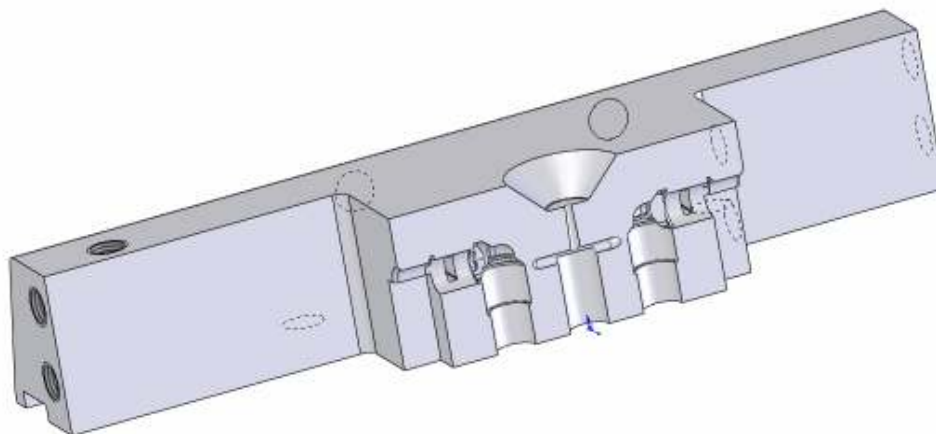
3.4.6 Konstrukce tvarových částí /6/

3.4.6.1 Čelisti (poz. 6,7 příloha 1) /6/

Hlavní část tvarů formy je tvořena v odjíždějících čelistech.

Polotovary těchto čelistí jsou součástí nakupovaného setu Hasco. U těchto čelistí je zhotoveno vybrání pro malá jádra (viz poz. 38 příloha 1). Čelisti je nutné odlehčit pro boční šupáčky a opěrky (viz poz. 39 ,35 příloha 1).

Jedna strana čelistí je zkrácena pro přívod vody, aby náustky nevyčnívaly z formy.

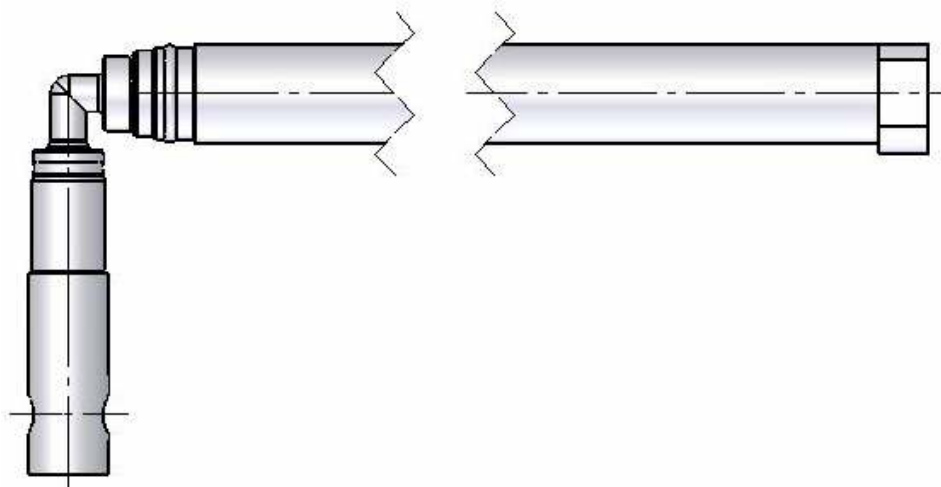


Obr. 3.12: Čelist

3.4.6.2 Jádra spodní a boční (poz. 36, 37 příloha 1) /6/

Na spodním jádře je ve formě nasazen stěrací vyhazovač (viz poz. 42 příloha 1), z toho důvodu je délka jádra protáhnuta až po upínací desku a jádro je opřeno o středící kroužek. Průměr jádra je volen tak, aby se stěrací vyhazovač nemusel upravovat a aby na konci tvaru na jádře byla malá ploška na dolícování a tvar nekončil sražením.

Boční a spodní jádra na sebe dosedají pod úhlem 90°, proto je nutné mít obě jádra zajištěna proti pootočení (kolíkem, drážkou).



Obr. 3.13: Boční a spodní jádro

3.4.6.3 Opěrka (poz. 35 příloha 1.) /6/

Pro stabilní přetahování výlisku při vytahování bočního jádra je ve formě opěrka, ve které je část tvaru výlisku, o kterou se výlisek při vytahování jádra opře. Pro opěrku je v čelistech vybrání. Opěrka je uchycena v mezidesce.

3.4.7 Rám formy /6/

Hlavní část formy je tvořena čelistovým setem K2500, zbytek částí je tvořen normáliemi firmy Hasco. Velikost rámu je volena 246 x 246 mm. Výška formy je 289 mm a splňuje podmínku pro minimální výšku formy pro lis (210 mm bez podkládání). Upínací desky jsou po stranách rozšířeny pro upínání na lis.

3.4.8 Mechanika a funkce formy /6/

Forma má dvě odjíždějící čelisti a dva odjíždějící šupáčky, jejich pohyb je zprostředkován pomocí vedení šikmými kolíky. Při sjíždění v poslední části čelisti i šupáčky dosedají na opěrnou desku, tím je i zaručeno středění formy v obou osách. Pro zpoždění odjíždění bočních jader, z důvodu odformování vnějších tvarů před přetahováním výlisku přes boční jádro se záporným osazením, je v šupáčcích zhotoven oválný otvor - vedení.

Vyhození výlisku probíhá po úplném rozevření formy a rozjetí čelistí i jader, je zprostředkováno stěracími vyhazovači, jež setrou výlisek, který zůstává na spodním jádře. Stěrací vyhazovače jsou ukotveny na vyhazovacích deskách, vyhazovací deska je ovládána lisem. Pro zajištění proti sevření formy s vyjetou vyhazovací deskou je forma vybavena čtyřmi zpětnými vyhazovači, které bylo pro nedostatek místa nutné vést skrz vodicí lišty.

3.4.9 Odvzdušnění formy

Odvzdušnění formy probíhá dělicí rovinou v čelistech a vzduch může také unikat v okolí jader. Díky pohybu jader je zajištěn samočisticí efekt.

3.4.10 Chlazení formy /4/

Z důvodů malých rozměrů výlisku a doporučené teploty formy 90 °C není nutné zhotovovat složité chlazení.

Temperančním médiem je voda.

Veškeré chlazení formy je umístěno symetricky v čelistích a horní desce. Dle tab. 3.1 a s ohledem na velikost a tvar čelistí, byl pro daný výlisek dle tloušťky od 0.7 do 2mm vybrán kanál průměru 8mm, vzdálenost od výlisku (dělicí roviny) je zvolena 15 mm a vzdálenost mezi kanály 19 mm. Voda proudí v jedné čelisti tam i zpět pouze vrtáním, bez propojek. Přívod i odvod chladicí vody je umístěn na spodní část formy, aby při odpojení formy voda vytekla ven a netekla po formě. Forma je na chladicí zařízení připojena klasickými normalizovanými náustky.

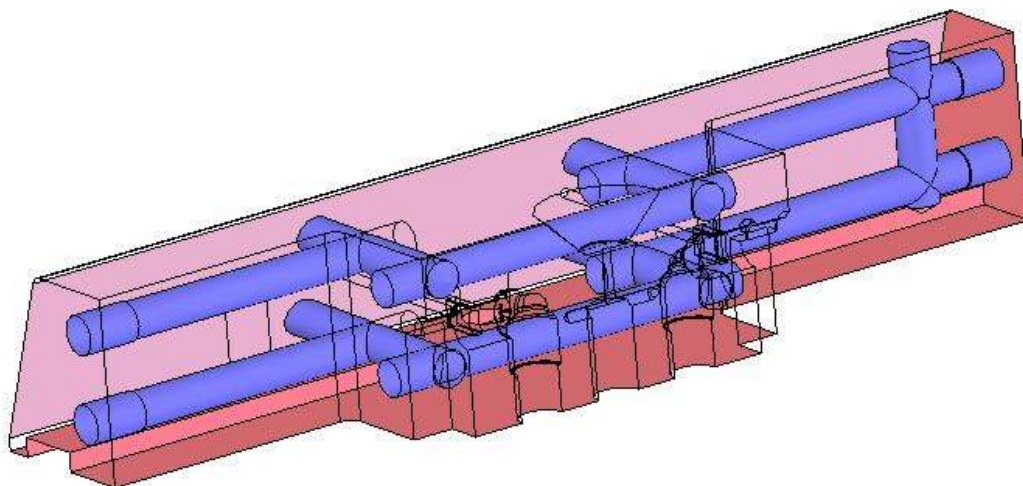
Jádra nejsou samostatně chlazena, komplikovalo by to konstrukci formy. Jádra jsou chlazena pouze stykem s chlazenými čelistmi a zbytkem formy. Tento princip byl vyzkoušen u předchozích podobných výlisků

Celková délka temperačních kanálů je 1040 mm.

Síla stěny výlisku se pohybuje od 0.7 do 2 mm.

Tab. 3.1: Volba a umístění chladících kanálů /4/

Tloušťka stěny výlisku (mm)	Vzdálenost mezi osou kanálu a výliskem (mm)	Vzdálenost kanálů (mm)	Průměr kanálu (mm)
0-1	11,3-15	10-13	4,5-6
1-2	15-21	13-19	6-8,5
3-4	21-27	19-23	8,5-11
4-6	27-35	23-30,5	11-14
6-8	35-50	30,5-40	14-18



Obr. 3.14: Schéma chlazení čelistí

3.5 Materiály použité ve formě a tepelné zpracování. /13/

Materiály jsou voleny dle zvyklostí nástrojárny.

Tvarové a více namáhané součásti jsou vyrobeny z materiálu W.Nr. 1.2767 (ekvivalent ČSN 19 655), tvarové díly jsou kaleny a popuštěny na 56 HRC.

Ostatní díly jsou vyrobeny z materiálu W. Nr. 1.1730 (ekvivalent ČSN 19 083), Izolační desky jsou z materiálu sklotextit.

3.5.1 Nástrojová ocel W.Nr. 1.2767 /13/

Charakteristika : Chrom - nikl – wolfram - molybdenová ocel ke kalení v proudu vzduchu s velkou prokalitelností. Ocel vykazuje poměrně vysokou tvrdost po kalení, zvlášť dobrou houževnatost proti namáhání tlakem rázy a údery, velmi dobrou odolnost proti opotřebení a poměrně dobrou stálost rozměrů při tepelném zpracování. Ocel je poněkud obtížněji tvárná za tepla a vykazuje mírně ztíženou obrábitelnost ve stavu žíhaném na měkko.

Vhodnost použití : nástroje pro tváření za tepla jako jsou malé zápustky vyžadující při vysoké tvrdosti také vysokou houževnatost, např. při tváření materiálu o vysoké pevnosti. Dále je ocel vhodná pro nože u stříhání za studena materiálů velkých tlouštěk, nože na šrot apod. a pro nejvýše namáhané nástroje pro ražení za studena. Pro lisování plastických hmot je z této oceli možné vyrábět velké tvárníky a tvárnice a tyto kalit na vzduchu.

Tab. 3.2: Chemické složení ocel W.Nr. 1.2767 /13/

Značka oceli	Chemické složení v %										
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni max	Co	P max.	S max.
W.Nr. 1.2767	0,35 až 0,45	0,40 až 0,70	0,20 až 0,40	1,40 až 1,80	0,40 až 0,80	0,20 až 0,40		3,80 až 4,60		0,03	0,035

Tab. 3.3: Tepelné zpracování oceli W.Nr. 1.2767 /13/

Způsob	Teplota [°C]	Postup
Kování	850 až 1050	Pomalou ochlazovat v suchém popelu nebo jiném tepelně izolačním materiálu
Žihání na měkko	610 až 650	Několik hodin prohřát (podle velikosti předmětu), většinou stačí 4 hodiny a pomalu ochlazovat v peci
Žihání ke snížení pnutí	600 až 630	1 až 2 hodiny prohřát a pomalu ochlazovat v peci
Kalení	830 až 860	Větší a členitější nástroje
	840 až 870	Ochladit v oleji na 180 až 220 °C
Popouštění	160 až 250	Ochlazovat na vzduchu , stupeň popouštění se řídí tvrdostí a houževnatostí nástroje dle popouštěcího diagramu

Tab. 3.4: Popouštěcí teploty v závislosti na tvrdosti /13/

°C	100	200	300	400	500	600
HRC	56	54	50	46	42	38

3.5.2 Nástrojová ocel W.Nr. 1.1730 /13/

Charakteristika: uhlíková nástrojová ocel vyznačující se dostatečnou tvrdostí základné vrstvy, vysokou houževnatostí a velmi značnou necitlivostí na kalící trhliny. Dále se ocel vyznačuje dobrou tvárností za tepla a dobrou obrobiteľnosť v žíhaném stavu.

Vhodnost použití: zámečnické a montážní nářadí, na nástroje k obrábění dřeva, kalené součásti forem - např. základové desky, pouzdra, sloupky, dorazy, pružící součástky a pod. Dále je ocel vhodná na zemědělské, kovářské a zednické nářadí.

Tab. 3.5: Chemické složení oceli W.Nr. 1.1730 /13/

Značka oceli	Chemické složení v %										
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni	Co	P(max.)	S(max.)
19 083	0,40 až 0,50	0,60 až 0,80	0,15 až 0,40							0,035	0,035

Tab. 3.6: Chemické složení oceli W.Nr. 1.1730 /13/

Způsob		Teplota [°C]	Postup
Kování		1050 až 800	Pomalou ochlazovat na klidném vzduchu nebo lépe např. v suchém popelu nebo v jiném tepelně izolačním materiálu
Žihání normalizační		840 až 860	Ochlazovat na vzduchu
Žihání na měkko		680 až 710	Několik hodin prohřát (podle velikosti předmětu), většinou stačí 4 hodiny a pomalu ochlazovat v peci
Žihání ke snížení pnutí		600 až 650	1 až 2 hodiny prohřát a pomalu ochlazovat v peci
Kalení	ve vodě	790 až 820	Velké a jednoduché předměty
	v oleji	800 až 830	Tenké průřezy tloušťky do 5 mm
Popouštění		180 až 300	Ochlazovat na vzduchu nebo ve vodě, stupeň popouštění se řídí tvrdostí a houževnatostí nástroje dle popouštěcího diagramu

Tab. 3.7: Popouštěcí teploty v závislosti na tvrdosti. /13/

°C	100	200	300	350
HRC	58	55	48	44

3.6 Technická dokumentace a podklady pro technologii výroby /12/

Technická dokumentace obsahuje 1 výkres sestavy, 29 výrobních výkresů vyráběných či upravovaných částí formy, protokol o konstrukci formy, 8 výkresů elektrod. Celá dokumentace byla vytištěna a předána do výroby a zároveň umístěna do elektronického archivu. V archivu jsou živé dokumenty s možností změny jen určeným lidem, a také „mrtvé“ výkresy v podobě pdf souborů. Následné změny v konstrukci jsou řešeny indexy výkresů.

Součástí konstrukce je i tvorba 3D modelů tvarových částí formy, elektrod včetně jiskrové mezery a kontury pro následné obrábění na obráběcím centru.

Počet a tvary a jiskřící mezery elektrod byly konzultovány se zkušeným nástrojařem, jde většinou o rotační elektrody, s kterými lze planetovat.

Jiskrová mezera je volena 0.2 mm na stěnu pro hrubování a 0.05mm na stěnu pro obrábění načisto.

Z každého výkresu elektrody lze vyčíst jiskrovou mezeru a nájezd.

Model formy je také vyexportován v E-drawingem (3d model formy) a je zpřístupněn nástrojárně. Slouží k náhledu při obrábění či k odměření. Takovýto soubor lze prohlížet na jakémkoliv PC.

3.7 Výroba formy

Po schválení konstrukce je předána dokumentace formy mistrovi nástrojárny, který určí „kmotra“, majícího formu na starost. Ten kontroluje objednaný materiál, skládá formu, spasovává části formy, leští tvarové plochy. Jedná také o nedostatcích formy či dokumentace s konstruktérem. Případně se stará o doladění formy po vzorkování.

S výrobou formy souvisí i tvorba programů CNC stroje pro obrábění tvarově složitých tvarů, o to se stará programátor, kterému konstruktér poskytne veškeré podklady.

3.8 Vzorkování a doladění formy

Po zhotovení formy putuje forma na lisovnu, kde jsou odlisovány první kusy pro vzorkování. Tyto vzorky jsou nechány 24 hodin vystárnout a následně jsou měřeny všechny jejich rozměry. Je zhotoven měrový protokol (viz. příloha 2). Tento měrový protokol se posílá na vyhodnocení, ke všem rozměrům či odchýlkám k dokumentaci je dodáno vyhodnocení, zda případné výchylky pro funkčnost výrobku nevadí, či zda je nutné upravit formu (lisovací proces).

Na této formě byla hned při prvních výliscích vidět nesymetričnost výčnělků na konci mezikusu u spoje druhé generace u jedné z dutin. Tento nedostatek byl způsoben špatným zajištěním elektrody při elektroerozivním obrábění. Ještě před měřením byla tvarová část opravena.

Z vyhodnocení měrového protokolu bylo nutné upravit pouze jeden funkční rozměr spodních jader u obou dutin. Toto jádro bylo úmyslně při konstrukci formy navrženo na horní toleranci, aby bylo případně možné tento rozměr doladit. Pro tuto úpravu nebylo nutné rozebírat formu, spodní jádra lze vyjmout po odejmutí spodního středícího kroužku.

Po této úpravě byl nástroj schválen pro sériovou výrobu.

3.9 Volba lisu, nastavení lisovacího procesu /1/

Lis je volen na základě velikosti výlisku a velikosti formy. Pro takto malé výlisky jsou v lisovně určeny lisy Demag 35,50. Velikost průměru šneku lisu je volena nejmenší dostupná varianta 18mm.

Nastavení lisovacího procesu (teplota formy, velikost dotlaku, teplota taveniny) vychází z doporučení zpracování vstřikovaného materiálu. Doba dotlaku byla stanovena na základě hmotnosti výlisku (doba dotlaku se zvyšuje až do okamžiku, kdy váha výlisku nepřibývá). Doba chlazení byla předběžně stanovena dle tloušťky stěny výlisku a případně je dále upravena dle teploty vypadávajících výlisků.

Parametry při přerušení výroby či při změně lisu je nutné doladit dle zkušenosti lisaře.

Celkové nastavení procesu pro danou formu je patrné z protokolu o zkoušce forem na plastické hmoty (viz příloha 3).

3.10 Výpočty /4/, /14/

Hodnoty pro výpočet jsou vzaty z Tabulek pro mechaniku a strojnictví. /13/

3.10.1 Vstřikovací kapacita a plastifikační kapacita

Vstřikovací kapacita Q_v

$$Q_v = \frac{(n \times m_v + m_x)}{x} = \frac{2 \times 1,4 + 0,25}{1,14} = 2,67 \text{ cm}^3 \quad (3.1)$$

kde:

n -násobnost [-]

m_v -hmotnost výlisku [g]

m_x -hmotnost vtokového zbytku [g]

Plastifikační kapacita Q_p

$$Q_p = \frac{n \times m_v + m_z}{t_c} = \frac{2 \times 1,4 + 0,25}{15} = 0,203 \text{ g / s} = 0,732 \text{ kg / hod} \quad (3.2)$$

kde:

t_c -doba cyklu

Minimální vstřikovací kapacita lisu by měla být 1kg/h.

3.10.2 Temperanční systém /4/, /14/

Výpočet je zjednodušený, neuvažuje tepelnou kontrakci s okolím, je počítáno s konstantní vzdáleností kanálu od výlisku, pro tento případ platí bilanční rovnice pro chlazení formy:

$$\Phi_t = \Phi_p \quad (3.3)$$

Φ_t - tepelný tok mezi temperovací kapalinou a formou Φ_p lze vyjádřit pomocí rovnice

$$\phi_p = \frac{m \times \Delta h_p}{t_c} = \frac{3,05 \times (605 - 220)}{15} = 79,6 \text{ W} \quad (3.4)$$

kde:

Δh_p -rozdíel entalpií materiálu výlisku pro teploty taveniny (210 ° C) a vyhození výlisku (120 ° C) [J/g]

m – hmotnosť výlisku včetně vtoku [g]

Φ_p - tepelný tok medzi výstřikem a formou [W]

$$\phi_t = k \times S(T_F - T_m)$$

$$\Phi_t \text{ lze vyjádřit pomocí rovnice } \phi_t = 48573 \times 13,27 \times 10^{-6} \times (210 - 80) \quad (3.5)$$

$$\phi_t = 83.8 \text{ W}$$

kde:

k – součinitel přestupu tepla [$Wm^{-2}K^{-1}$]

S- celková plocha chladících okruhů [m^2]

T_F – teplota povrchu tvarové dutiny [°C]

T_m - teplota chladicího média [°C]

$$S = l \times \pi \times r^2 = 0,264 \times \pi \times 0,004^2 = 13,27 \times 10^{-6} m^2 \quad (3.6)$$

kde:

l -délka temperančních kanálů v okolí tvarové dutiny [m]

r – průměr kanálu [m]

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_k} + \frac{h_{tk}}{\lambda_F} = \frac{1}{51890} + \frac{0,015}{11,4 \times 10^3} = 0.000020587 \Rightarrow k = 48573 \text{ } Wm^{-2}K^{-1} \quad (3.7)$$

kde:

α_k – součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperančního kanálu a temperanční kapalinou [$Wm^{-2}K^{-1}$]

h_{tk} – střední vzdálenost mezi povrchem dutiny a osou temperančního kanálu [m]

λ_F – součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [$W m^{-1}K^{-1}$]

$$\alpha_k = 0.0235(Re^{0.8} - 230) \times (1,8 Pr^{0.3} - 0,8) \times \frac{\lambda_{tm}}{d_{h1}}$$

$$\alpha_k = 0.0235((201,86 \times 10^3)^{0.8} - 230) \times (1,8 \times 2.135^{0.3} - 0,8) \times \frac{0.699}{0.008} \quad (3.8)$$

$$\alpha_k = 51890 \text{ } Wm^{-2}K^{-1}$$

kde:

λ_{tm} – součinitel tepelné vodivosti temperovacího média – vody [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]

Re – Reynoldsovo číslo temperovacího okruhu

$$\text{Re} = \frac{c_k \times d_{hi}}{\nu} = \frac{9.21 \times 0.008}{0.365 \times 10^{-6}} = 201,86 \times 10^3 \quad (3.9)$$

kde :

c_k – rychlost proudění temperační kapaliny získáno ze simulace [m s^{-1}]

d_{hi} –hydraulický průměr kanálu pro kruhový průřez roven průměru kanálu
[m]

ν - kinematická viskozita temperovací kapaliny [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

Pr – Prandtlovo číslo pro temperovací kapalinu

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{0.365 \times 10^{-6}}{171 \times 10^{-9}} = 2,135 \quad (3.10)$$

kde:

a – součinitel teplotní vodivosti kapaliny [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

$$a = \frac{\lambda_{tm}}{c \times \rho_v} = \frac{0.699}{4.199 \times 10^3 \times 972} = 171 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (3.11)$$

kde:

ρ_v – hustota vody při 80°C [kg m^{-3}]

c - měrná tepelná vodivost vody při 80°C [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

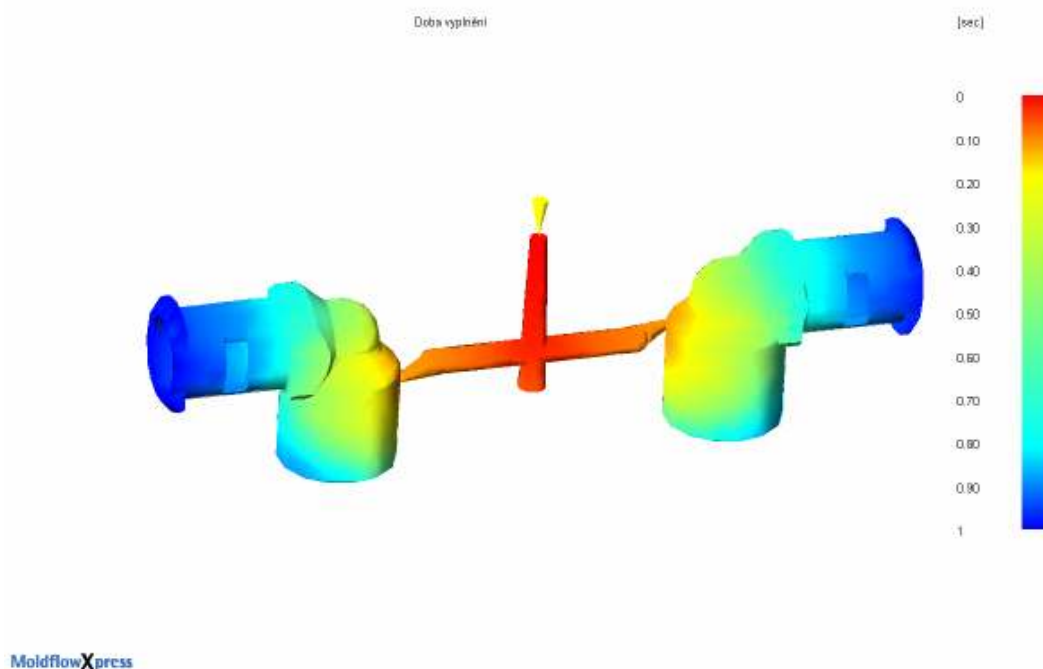
Z výpočtu vyplývá, že zvolený temperační systém je navržen správně.

3.11 Simulace vstřikování /9/, /12/

Proces plnění byl simulován dvěma softwary.

3.11.1 Simulace pomocí MoldflowXpress /12/

Simulační software MoldflowXpress je součástí softwaru, který je použit pro konstrukci formy a je velmi zjednodušený. Pro danou simulaci stačí model výlisku popř. vtokové soustavy, druh materiálu, místo vtoku, teplota taveniny a teplota formy. Výsledek nebere v úvahu možnosti tlaku skutečného formovacího stroje, rozložení teploty taveniny nebo tlak. Výsledkem této simulace je stanovisko, že se díl naplní a předpokládaná doba plnění (viz obr. 3.5) Dle animace plnění lze odhadnout studené spoje a místo hromadění vzduchu.



Obr. 3.15: Simulace Moldflow Xpres

Simulace byla úspěšná a její vyhodnocení je kladné.

3.11.2 Simulace pomocí Moldflow Plastics Insight –mpi /9/

3.11.2.1 Příprava simulace /9/

Tímto softwarem bylo simulováno plnění a chlazení při procesu vstřikování.

Základem byl import geometrie a příprava modelu výlisku a vtokové soustavy.

Pro import byl použit formát xt. Model byl opraven. Model výlisku je reprezentován výpočtovým modelem Fusion mesh a pro další výsledky (nahlédnutí do výlisku) i 3D mesh. Programem byla nejprve vygenerována fusion síť o cca 27000 elementech, tato síť byla následně pomocí automatické opravy opravena a nakonec i ručně doopravena - zejména byly upraveny elementy s vysokou hodnotou „aspect ratio“. Z takto opravené fusion sítě byla vygenerována 3D síť o 287 000 elementech.

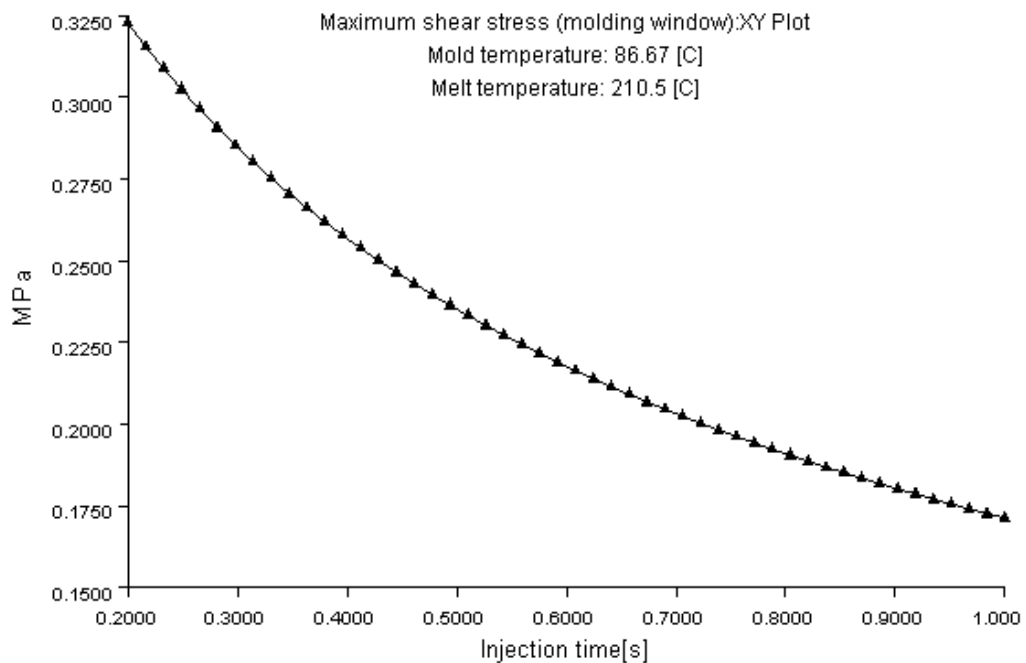
V databázi mpi materiálu byl vybrán použitý materiál a vstřikovací stroj.

Geometrie os chladících okruhů byla vytvořena v Solidworksu a naimportována ve formátu IGES do mpi. K ose byl přiřazen průměr chladících kanálů a tlak, který je v temperančním systému.

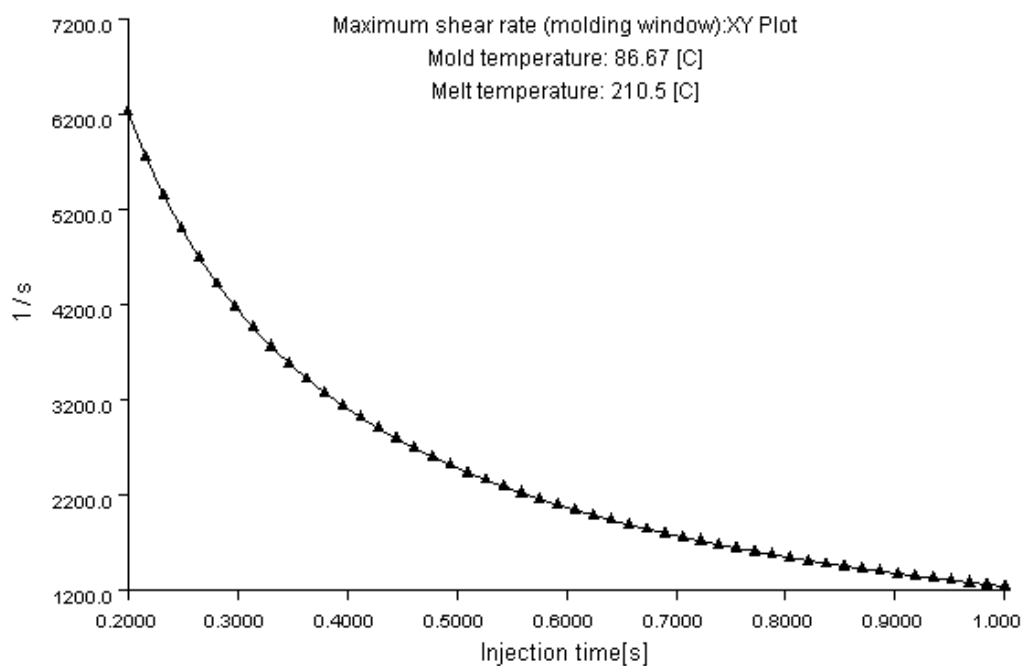
Vtoková soustava byla namodelována přímo v mpi.

3.11.2.2 Doporučení umístění vtoku a závislosti parametrů /9/

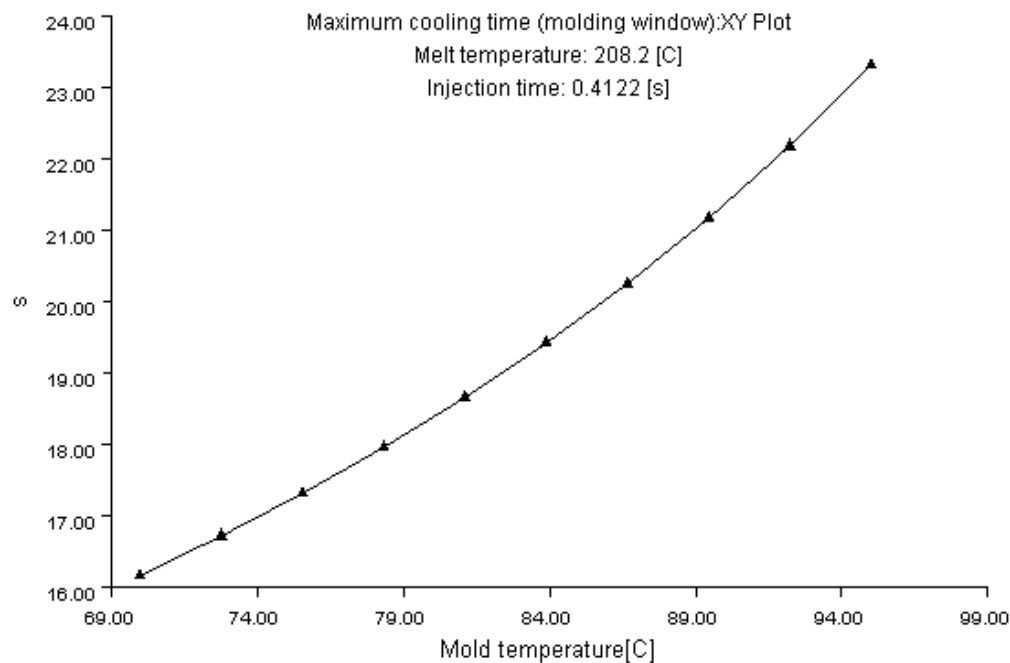
Před samotnou simulací byl spuštěn modul optimalizace vstřikovacího procesu a modul pro volbu umístění vtoku. Výsledkem simulací jsou závislosti mezi jednotlivými parametry procesu a barevné schéma vhodnosti umístění vtoku.



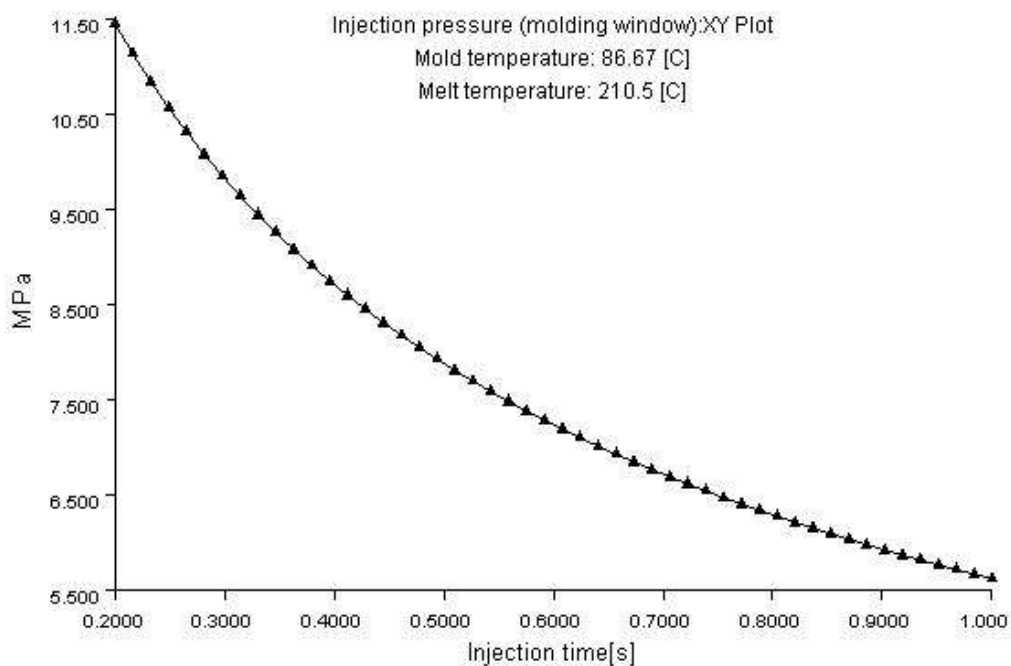
Obr. 3.16: Závislost smykového napětí na času době vstřiku.



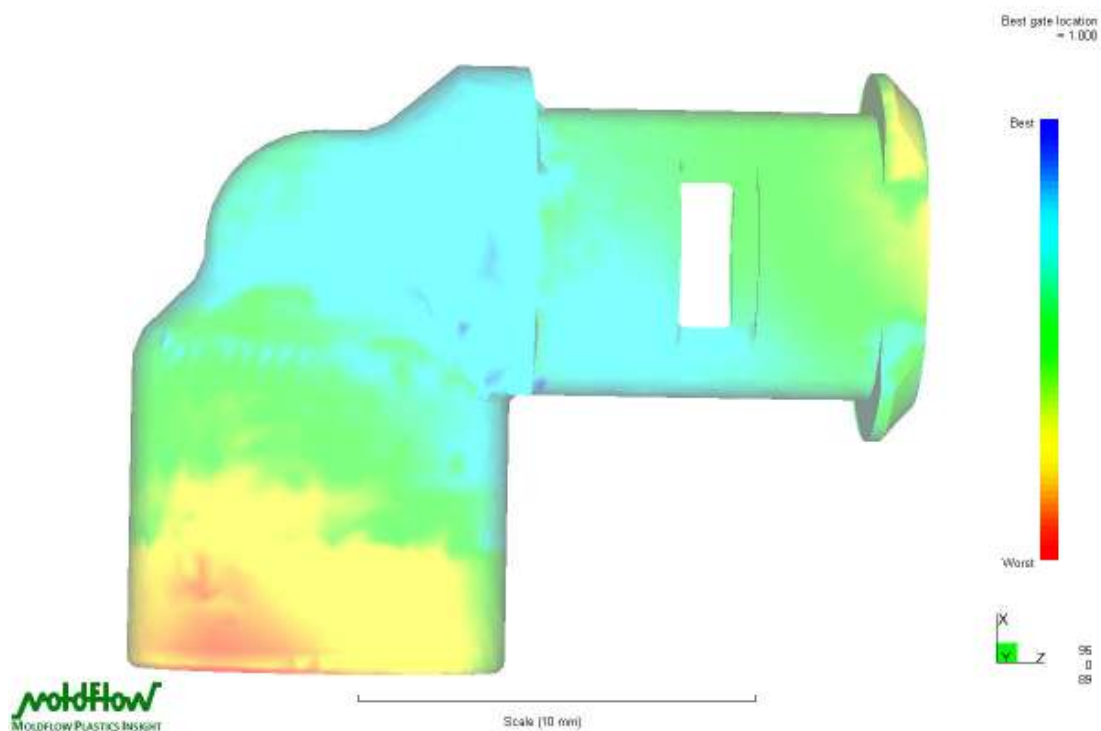
Obr. 3.17: Závislost smykové rychlosti na době vstřiku



Obr. 3.18: Závislost maximální doby chlazení na teplotě formy.



Obr. 3.19: Závislost minimálního potřebného vstřikovacího tlaku na době vstřiku.



Obr. 3.20: Doporučení umístění vtoku.

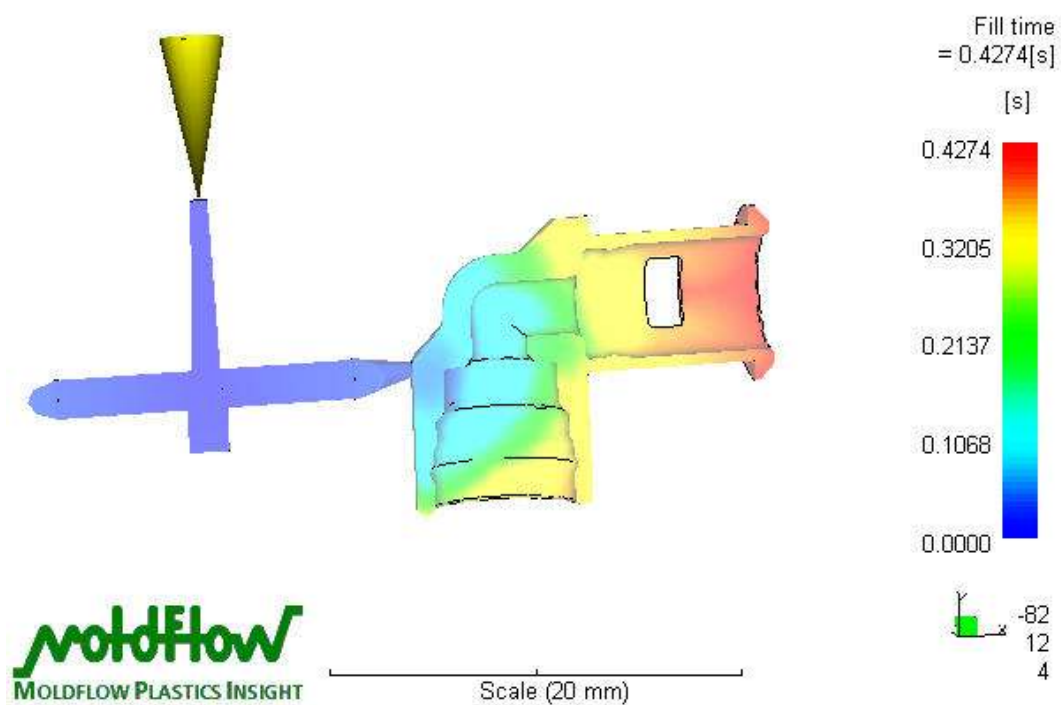
3.11.2.3 Vlastní simulace /9/

V tab. 3.8 jsou uvedeny základní parametry, počáteční a vstupní parametry simulace.

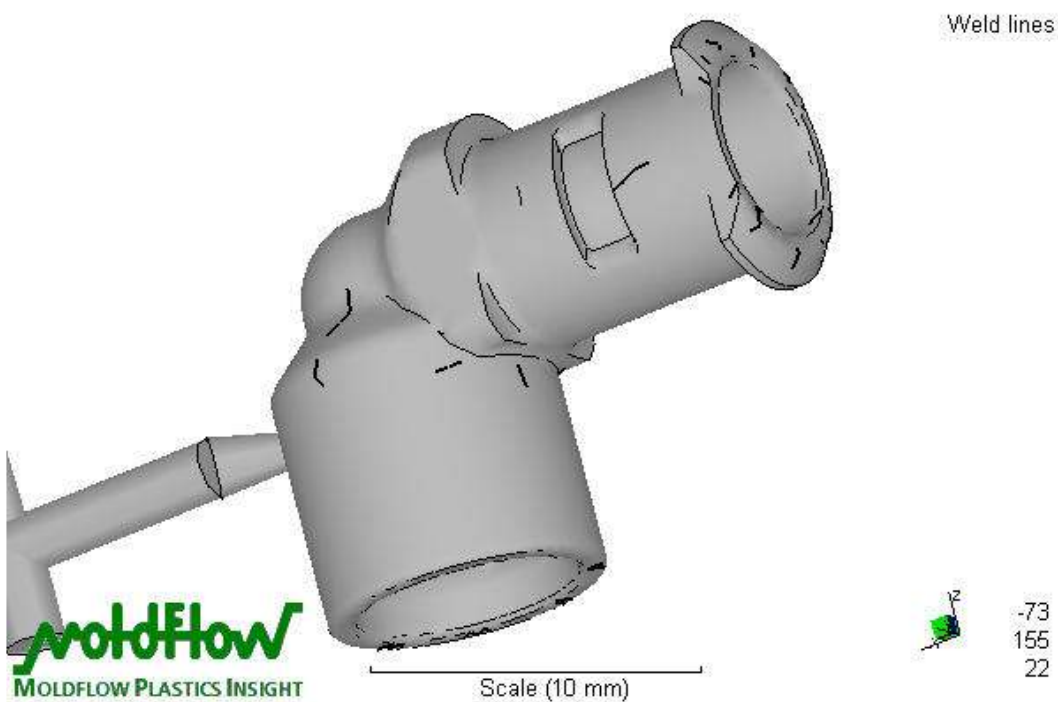
Tab. 3.8: Parametry simulace

Čas vstřiku	0.4s
Teplota formy	85 ° C
Teplota taveniny	210 °C
Přepnutí na dotlak	Automatické (při 99% naplnění)
Dotlak	650 Bar
Doba cyklu	15s
Doba otevření: formy	3s
Teplota chladicího média	80 ° C
Tlak chladicího média	5 Bar
Ostatní parametry	Voleny automaticky

Na daný proces byl aplikován modulu fill, flow, cool , shrinkage, warpage.
 Výsledky simulace nejlépe reprezentují animace či 3D modely - v tištěné podobě pak následující obrázky.

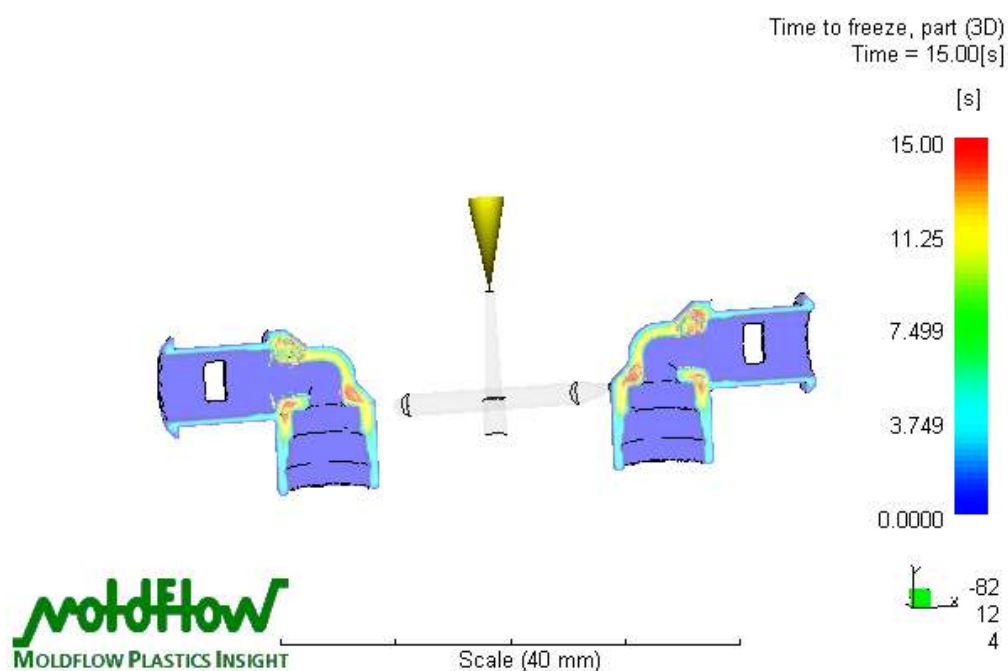


Obr. 3.21: Čas plnění vylisku.



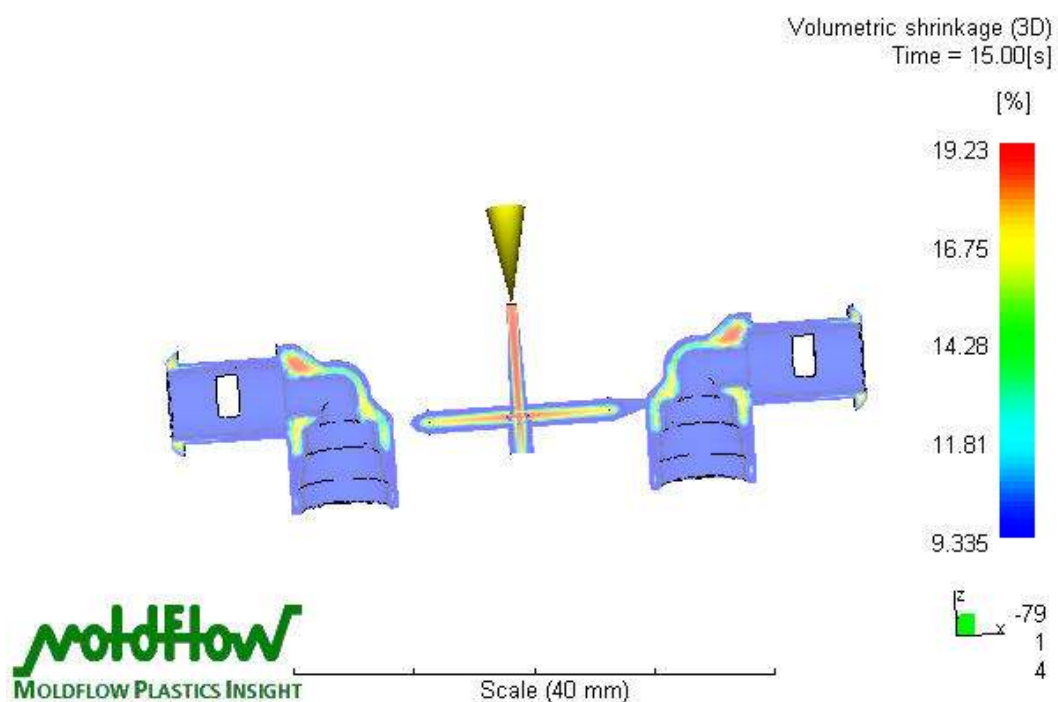
Obr. 3.22: Studené spoje.

Z obr 3.22 je zřejmé, že studené spoje nejsou v kritických místech, tedy v místech, kde je součást mechanicky namáhána (konce dutých válců a nejvíce pak válec bez oken – do tohoto konce přijde při montáži vsunout díl s přesahem).

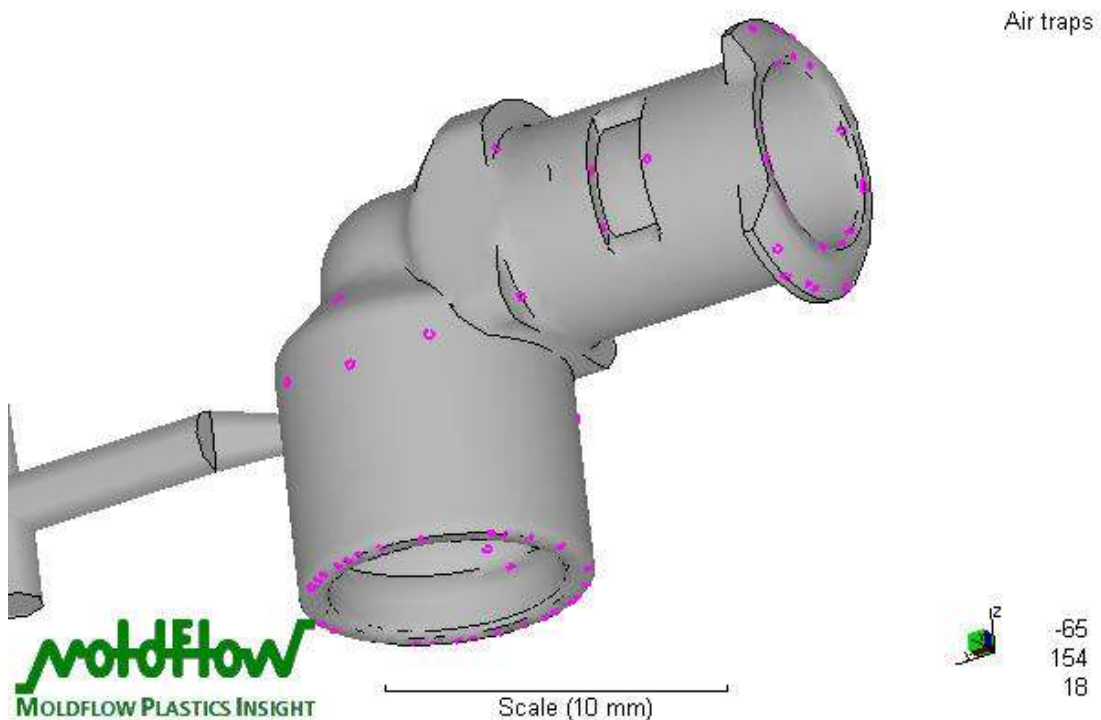


Obr. 3.23: Čas ztuhnutí materiálu.

Z obr. 3.23 je patrné, že nejteplejší místo ve výlisku ztuhne po 13 vteřinách.



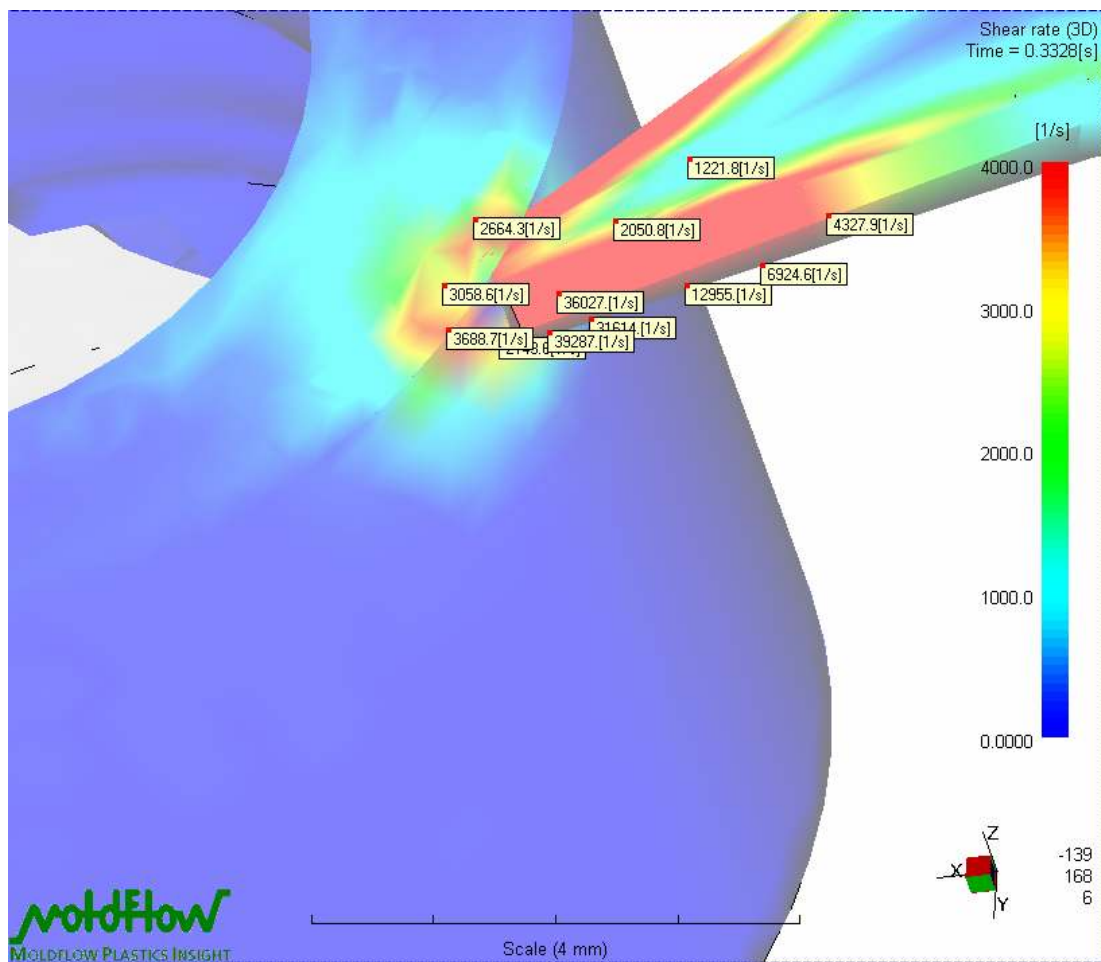
Obr. 3.24: Objemové smrštění výlisku.



Obr. 3.25: Hromadění vzduchu.

Dle obr. 3.24 je ve většině objemu vylisku objemové smrštění 9.4%, což odpovídá 2.1% lineárního smrštění, v místech se silnější stěnou v důsledku zamrznutí vtoku a ukončení doplňování materiálu ve fázi dotlaku dosahuje objemové smrštění až 20% (2.7% lineární smrštění). Při konstrukci formy bylo počítáno s 2.1% smrštěním.

Z obr. 3.25 plyne ze většina vzduch se hromadí na koncích dutých válců, v těchto místech může vzduch unikat okolo vnitřních samočisticích jader.

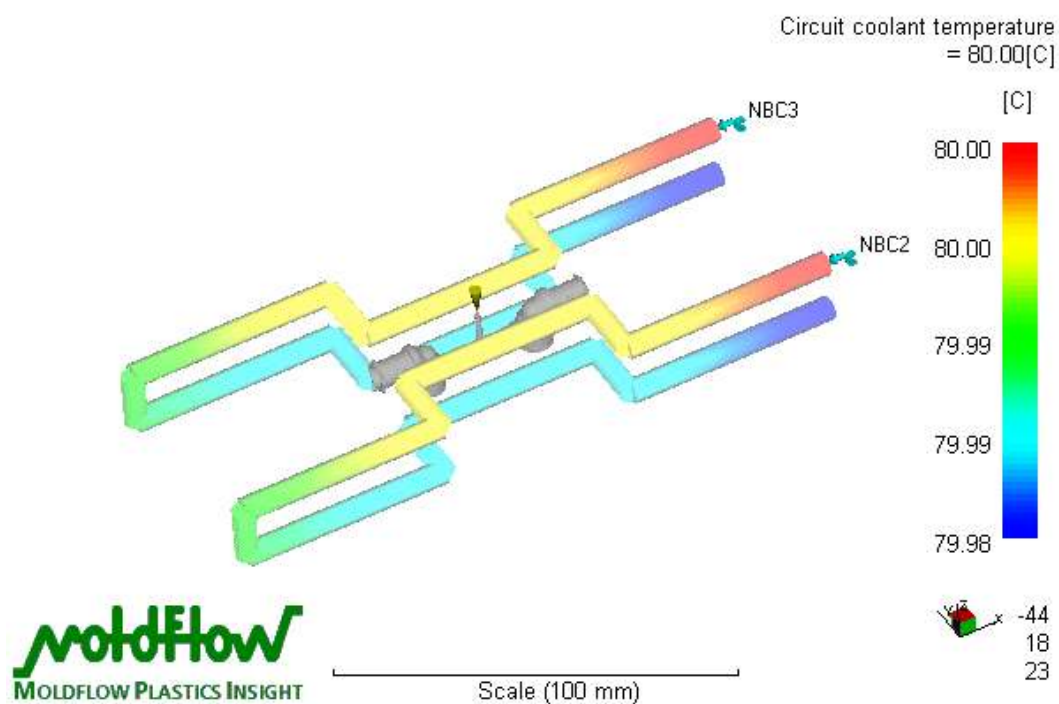


Obr. 3.26: Smyková rychlost v okolí vtoku v čase 0.33 sekundy.

Dle obr. 3.26 je zřejmé, že maximální smyková rychlost se pohybuje okolo 38000 s^{-1} a nepřekračuje limit daný výrobcem materiálu 40000 s^{-1} .

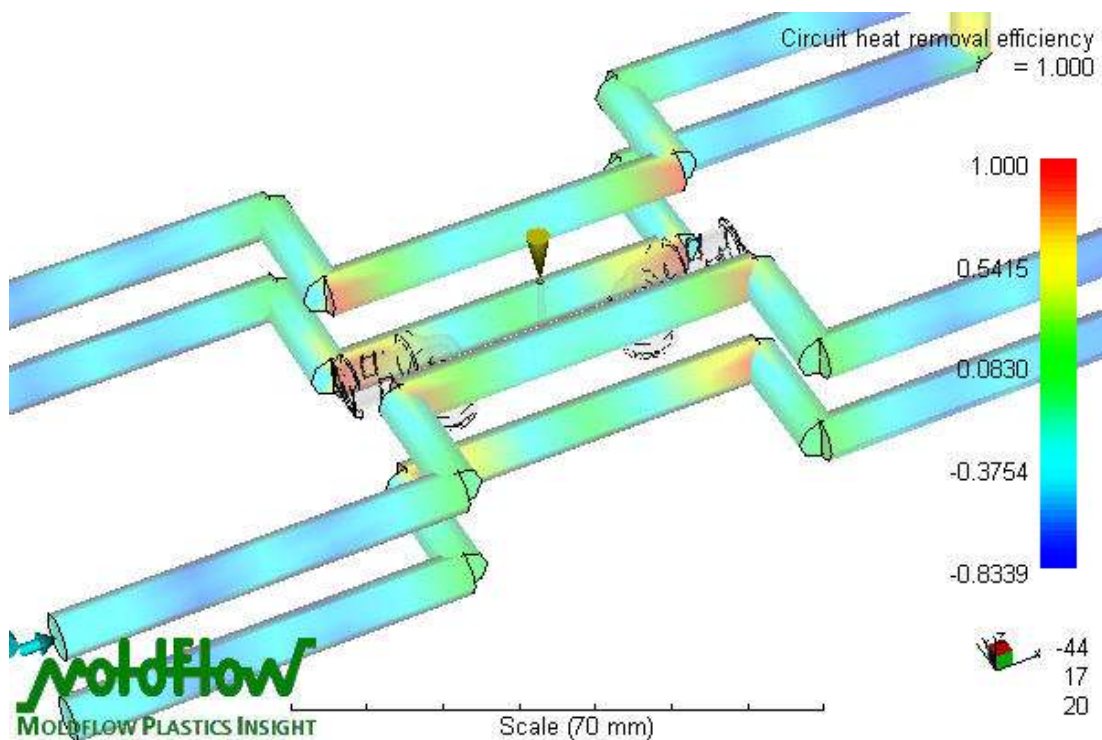


Obr. 3.27: Ukázka teplotního pole dílu v čase 0.9 sekundy

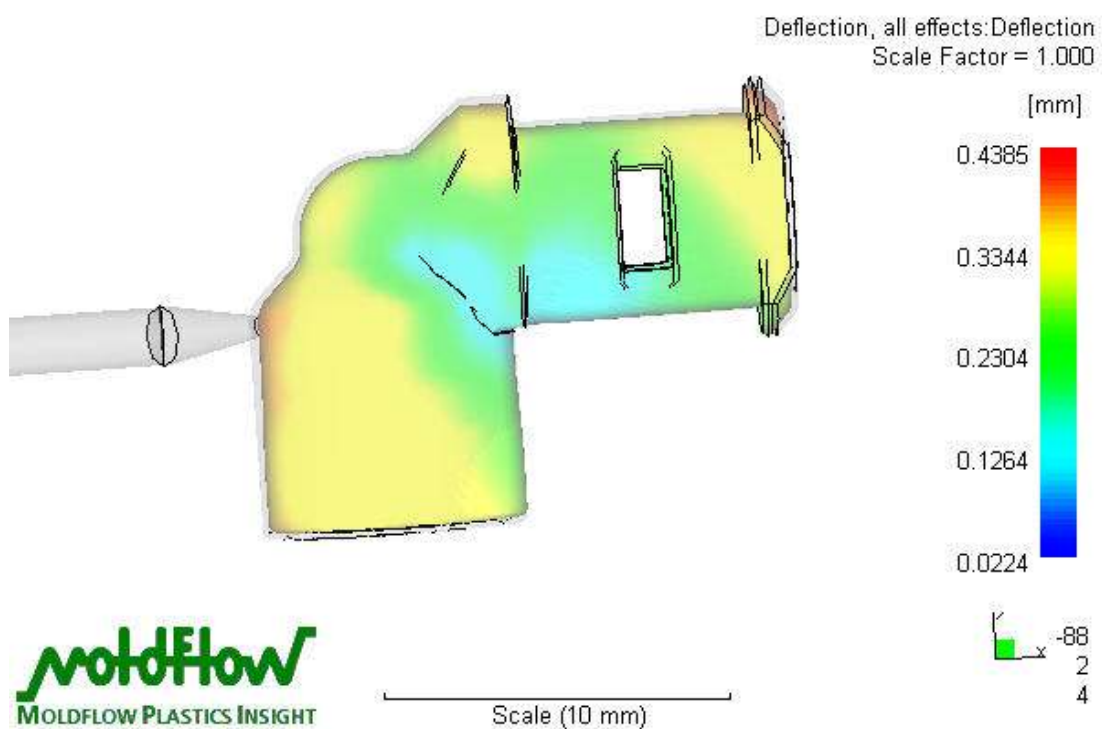


Obr. 3.28: Teplota chladicího média v kanálech.

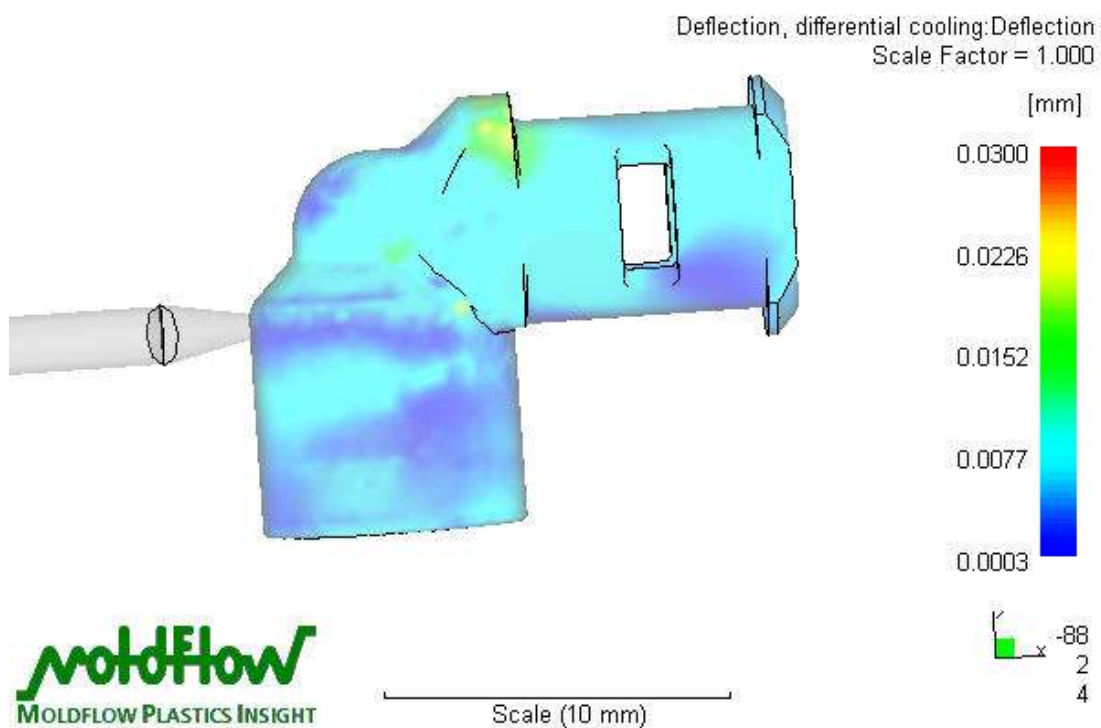
Simulačním programem bylo spočítán průtok kanály 27 litru za minutu a odpovídající Reynoldsovo číslo 2.7×10^5 , což zaručuje účinné chlazení.



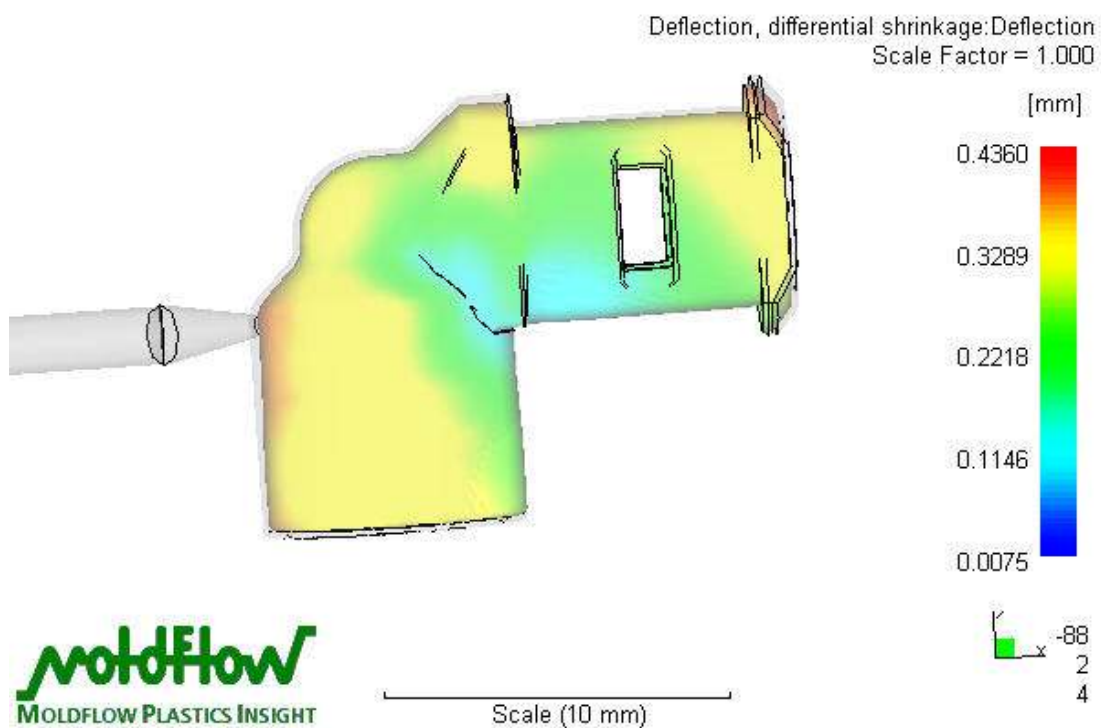
Obr. 3.29: Efektivita chladicích okruhů.



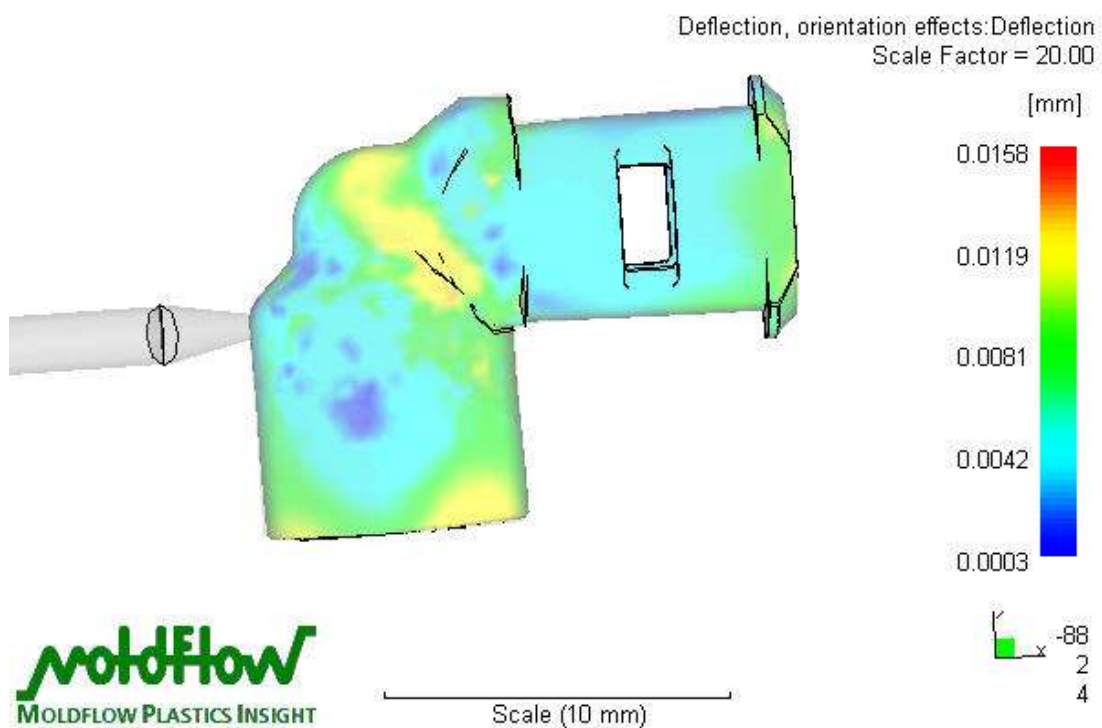
Obr. 3.30: Celková deformace.



Obr. 3.31: Deformace způsobená nestejnoměrným chlazením.



Obr. 3.32: Deformace způsobená nestejnoměrným smrštěním



Obr. 3.33: Deformace způsobená odlišnou orientací makromolekul při plnění.

4. Časové a ekonomické zhodnocení

4.1 Časové zhodnocení

Časový průběh konstrukce formy, výroby a uvolnění dílu je patrný z časového harmonogramu (viz tab. 4.1). V tomto harmonogramu symbolizují obarvená pole plán, křížky pak termín splnění dílčích plánů. Dva křížky v poli nákupu materiálu symbolizují dva termíny dodání materiálu, s první termínem byly dodány všechny normálie kromě horké trysky. Opožděné dodání trysky nemělo vliv na zpoždění výroby, tryska se vkládá do formy až ke konci výroby.

Tab.4.1: Časový harmonogram průběhu formy od konstrukce po uvolnění dílu.

	ROK - 2006																							
KT	30.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.	41.	42.	43.	44.	45.	46.	47.	48.	49.	50.	51.	52.	
konstrukce			X					X																
nákup materiálu							X				X													
výroba dílů									X															
skládání formy																								
zkušební lisování																								
proces uvolnění dílů																								

Bylo naplánováno celkem 820 výrobních hodin, forma byla zhotovena za 672 výrobních hodin. Výrobní hodiny lze rozepsat na jednotlivá stanoviště. (viz tab. 4.2). Hodiny, které zobrazují počet hodin konstrukce jsou mylné, způsobené nenahlašováním konstruktéra do systému pracovního terminálu. Hodiny konstrukce by se neměly počítat do výrobních hodin, tato chyba byla způsobena systémem pracovního terminálu. (Hodinová sazba konstrukce je rozpočítána do výrobních hodin nástrojárny jako režie).

Tab.4.2: Počty hodin na jednotlivá stanoviště.

	S T A V O D P R A C O V A N Ý C H H O D I N								
práce celkem hodin	konstrukce	programování	hrusky	frézky	soustruh	drátovky	hloubičky	kon. stroje	ruční práce
672,1	(55)	64,9	80,5	85,9	84,3	21,8	129,8	85,3	144,8

4.2 Ekonomické zhodnocení

Celkové náklady na formu byly naplánovány na 799 280,- Kč, z toho 144 000,-Kč na materiál a 659 280,- Kč na výrobu. Celkové náklady na materiál činily 184 405,- Kč a 442 987,- Kč na výroby. Rozdíl tedy činí 172 265,- Kč. Odchylka plánu a skutečnosti je způsobena nákupem celého čelistového setu, který je sice dražší než jednotlivé neobrobené polotovary, ale nakoupením tohoto setu není potřeba tolik výrobních hodin. Rozdíl plánu od skutečnosti byl také způsoben hladkým průběhem uvolňování výrobku - pouze jedna úprava jádra.

5. Závěr

Cílem diplomové práce bylo především navrhnout konstrukci nástroje pro daný plastový díl. Konstrukce dílu byla naplánována na 5 týdnů, v tomto termínu byla i vyrobena. Termín na výrobu celé formy by pánován na 20 týdnů, byla stihnuta v 17 týdnech. Ve výkresové dokumentaci se neobjevily žádné výrazné nedostatky. Výsledkem je funkční forma, kterou lze sériově vyrábět daný díl. Forma byla uvolněna po druhém nasazení na lis, protože byla nutná korekce jednoho rozměru. Forma za 4 měsíce nalisovala 69 700 kusů dobrých výlisků. Náklady na výrobu formy byly cca 627 000,- Kč oproti předkalkulaci 800 000,- Kč.

Při vyhodnocení procesu a formy simulací lze konstatovat, že koncepce konstrukce formy je navržena správně, lze jen spekulovat o vhodnějším umístění vtoku do místa s největší tloušťkou stěny, což by znamenalo otočit výlisek o 90 ° ve formě. Původní návrh konstrukce měl umístění do tohoto bodu, při schvalování však bylo rozhodnuto o tomto řešení.

Temperace formy je navržena dostatečně. Doba chlazení a tedy i délka celého cyklu jsou na dolní mezí. K zvýšení odvodu tepla by přispělo chladit vnitřní jádra buď přivedením chladicího média co nejblíže k tvaru, což by bylo obtížné vzhledem k malým rozměrům a nutnosti dělení, či vnitřky jader vyrobít z materiálu s lepším prostupem tepla.

Deformaci výlisku konstruktér může jen předpovídat. Ze simulace je patrné, že největší podíl na deformaci má rozdílné smrštění výlisku, které je v závislosti na umístění vtoku a technologických parametrech. Tuto deformaci může konstruktér formy ovlivnit jen omezeně. Větší vliv než změna konstrukce formy, by měla odlišná konstrukce dílu – s konstantní silou stěny. Deformace v závislosti na rozdílném chlazení a orientace makromolekul během plnění jsou nepatrné.

Nastavení technologických parametrů je pro danou formu vcelku optimální, za zvážení stojí úprava profilu rychlosti vstřiku pro snížení smykové rychlosti nebo prodloužení doby vstřiku či zvětšení vtokového ústí.

6. Literatura

/1/ <http://www.demag.com>

/2/ <http://www.shi.co.jp>

/3/ <http://www.dmeuniversity.net>

/4/ <http://www.palstics.bayer.com>

/5/ <http://www.jansvoboda.cz>

/6/ <http://www.hasco.com>

/7/ <http://www.techtydenik.cz>

/8/ <http://www.siemens.cz>

/9/ <http://www.moldflow.com>

/10/ <http://www.campusplastics.com>

/11/ <http://www.ticona.com>

/12/ <http://www.solidworks.com>

/13/ <http://www.jkz.cz>

/14/ Jirků, S.; Klepš, Z; Nožička, J.: Tabulky pro mechaniku a strojnictví, ČVUT ,
Praha, 1993

7. Přílohy

- 1) Sestava formy
- 2) Měrový protokol s výkresem výlisku
- 3) Protokol o zkoušce formy na plastické hmoty

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

25. května 2007

.....

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/3000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in the case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of thesis and the consultant.

May 25, 2007

.....